

República Federativa do Brasil  
Ministério do Desenvolvimento, Indústria  
e do Comércio Exterior  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0615891-9 A2**

(22) Data de Depósito: 01/09/2006  
(43) Data da Publicação: 31/05/2011  
(RPI 2108)



(51) *Int.Cl.:*  
G01V 3/26 2006.01

(54) Título: **APARELHO PARA INVESTIGAR UMA  
FORMAÇÃO DE TERRESTRE ATRAVESSADA POR  
UM FURO DE POÇO**

(30) Prioridade Unionista: 09/09/2005 US 11/223,644

(73) Titular(es): PRAD RESEARCH AND DEVELOPMENT N.V.

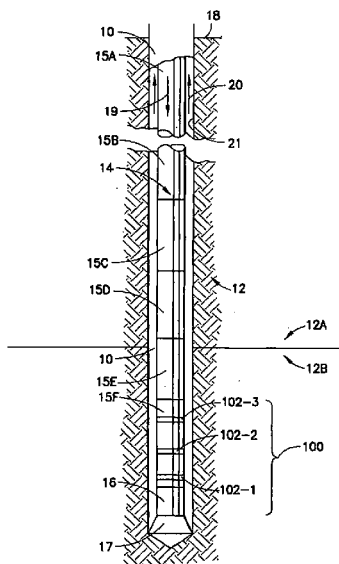
(72) Inventor(es): ANTHONY COLLINS, BRIAN CLARK, JEFFREY  
TARVIN, MIN-YI CHEN

(74) Procurador(es): Walter de Almeida Martins

(86) Pedido Internacional: PCT US2006034160 de 01/09/2006

(87) Publicação Internacional: WO 2007/032929 de 22/03/2007

(57) Resumo: APARELHO PARA INVESTIGAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE ATRAVESSADA POR UM FURO DE POÇO São fornecidos um aparelho e metodologias de perfuração com perfilagem para medir potencial de escoamento em uma formação terrestre. O aparelho e metodologias podem ser utilizados para localizar informações relevantes sobre as operações de perfuração. De modo particular, visto que a medição do potencial de escoamento se refere diretamente ao fluxo de fluido, as medições do potencial de escoamento podem ser usadas, para localizar informações relevantes sobre as operações de perfuração, tais como condições de perfuração sub-balanceada, pressões anormais na formação, fraturas abertas, a permeabilidade da formação, e pressão da formação.



APARELHO PARA INVESTIGAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE ATRAVESSADA  
POR UM FURO DE POÇO

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

CAMPO DA INVENÇÃO

5           Essa invenção se refere, de um modo geral, ao setor  
dos hidrocarbonetos. De modo particular, essa invenção se  
refere a aparelho e métodos para medir potenciais de  
escoamento resultantes dos transientes de pressão em uma  
10           formação terrestre atravessada por um furo de poço. Essa  
invenção também se refere a maneiras para fazer  
determinações a respeito de características da formação  
terrestre, como resultado das medições do potencial de  
escoamento. Uma dessas características é a permeabilidade  
da formação em suas diferentes profundidades, embora a  
15           invenção não seja limitada a isso.

ESTADO DA TÉCNICA

          O potencial de escoamento, também chamado comumente  
de potencial eletrocinético, é um potencial elétrico gerado  
por um eletrólito (p.ex., água) fluindo através de um meio  
20           poroso. O histórico com respeito à possibilidade de fazer  
medições do potencial de escoamento em um furo de poço vem  
de longa data. Na Patente norte americana U. S. Nº  
2.433.746, Doll sugeriu que uma vigorosa vibração de um  
aparelho no fundo de um poço pode gerar oscilações de  
25           pressão e movimento de fluido com relação à formação, que

por sua vez pode dar origem a potenciais mensuráveis de escoamento, devido a um fenômeno do potencial eletrocinético. Na Patente norte americana U. S. N° 2.814.017, Doll sugeriu métodos para investigar as permeabilidades das formações terrestres, pela observação das diferenças na fase entre ondas de pressão periódicas passadas através das formações e potenciais gerados pelo movimento oscilatório do fluido de formação causado por essas ondas de pressão. Ao contrário, uma corrente elétrica periodicamente variável foi sugerida ser usada para gerar movimento oscilatório do fluido da formação, que por sua vez gerava ondas de pressão periódicas na formação. Medições deviam ser feitas do deslocamento de fase entre as quantidades geradoras e as geradas, e uma indicação direta da permeabilidade relativa da formação assim obtida.

Na Patente norte americana U. S. N° 3.599.085 de A. Semmelink, intitulada "Aparelho para Perfilagem de Poço por Medição e Comparação dos Potenciais Causados por Excitação Sônica", a aplicação da energia sônica de baixa frequência para a superfície da formação foi proposta, a fim de criar grandes pulsos eletrocinéticos na área imediata do gerador sônico. De acordo com a divulgação dessa patente, os pulsos eletrocinéticos resultam da compressão (isto é, a competição entre viscosidade e inércia) da formação, e os pulsos do potencial de escoamento geram movimentos periódicos do fluido de formação com relação à rocha da

formação. O movimento de fluido produz potenciais eletrocinéticos detectáveis da mesma frequência que a energia sônica aplicada e tendo magnitudes em qualquer dado local diretamente proporcional à velocidade do movimento de fluido naquele local, e inversamente proporcional ao quadrado da distância do local de pulso do potencial de escoamento. Visto que a velocidade de fluido foi verificada variar de seu valor inicial, com o aumento da extensão de curso através da formação, a uma taxa dependente em parte da permeabilidade de rocha da formação, foi sugerido que a magnitude do potencial eletrocinético em qualquer determinada distância do pulso fornecesse uma indicação relativa de permeabilidade da formação. Pela provisão de uma relação entre as magnitudes do potencial eletrocinético (amplitudes senoidais) em locais afastados do gerador sônico, de que a profundidade da camada eletrocinética pode ser derivada, a permeabilidade real pode ser, por sua vez, determinada.

Na Patente norte americana U. S. N° 4.427.944, Chandler sugeriu uma ferramenta para fundo de poço do tipo estacionário e um método para determinar a permeabilidade da formação. A ferramenta para furo de poço inclui um dispositivo de cunha, que é forçado para engate com a superfície da formação em um local desejado, e que inclui meios para injetar fluido dentro da formação e eletrodos para medir transientes do potencial de escoamento

eletrocinético, e tempos de resposta resultantes da injeção do fluido. A injeção de fluido é, de modo eficiente, uma excitação do pulso de pressão da formação, que faz com que um fluxo transiente ocorra na formação. Chandler sugere uma  
5 medição do tempo de resposta característico dos potenciais de escoamento transientes gerados na formação ou nesse fluxo, a fim de extrair informações exatas sobre a permeabilidade da formação.

Na Patente norte americana U. S. N° 5.503.001  
10 (1996), Wong propôs um processo e aparelho para medir, na frequência finita, o potencial de escoamento e a voltagem eletro-osmótica induzida, devido às oscilações de pressão da frequência finita aplicada e à corrente alternada. O aparelho sugerido inclui um transdutor eletromecânico, que  
15 gera oscilações da pressão diferencial entre dois pontos em uma frequência finita e uma pluralidade de eletrodos que detectam o diferencial de pressão e o sinal do potencial de escoamento entre os mesmos dois pontos próximos à fonte da aplicação de pressão e na mesma frequência usando um  
20 amplificador síncrono tipo 'lock-in' ou um analisador digital de resposta de frequência. De acordo com Wong, devido ao fato do aparelho da invenção medir a pressão diferencial nos meios porosos entre dois pontos nas frequências finitas próximas à fonte da pressão (ou  
25 corrente) aplicada, ele reduz substancialmente o efeito de fundo causado pela pressão hidrostática, devido à

profundidade da formação sendo medida.

Devido ao longo histórico e aos múltiplos ensinamentos da técnica anterior, acredita-se que, na verdade, antes das medições de campo feitas em apoio à  
5 presente invenção, nenhuma medição jamais foi feita no fundo do poço dos transientes do potencial de escoamento nos campos de petróleo atuais. As razões para a falta de implementação real das modalidades da técnica anterior opostas são diversas. De acordo com Wong, nem o potencial  
10 de escoamento, nem a medição eletro-osmótica em separado é uma indicação confiável de permeabilidade da formação, especialmente em formações de baixa permeabilidade. Wong menciona que tentativas para medir o sinal do potencial de escoamento com eletrodos em distâncias superiores a um  
15 comprimento de onda entre si são falhas, visto que a oscilação da pressão se propaga como uma onda sonora e a diferença de pressão irá depender da magnitude e da fase da onda, e o sinal do potencial de escoamento será muito menor, visto que considerável energia é perdida para  
20 dissipação viscosa ao longo de uma distância dessas. Além disso, Wong declara que a aplicação de um fluxo de CC a uma formação e medição da voltagem de resposta no domínio de tempo não irá funcionar em formações com baixa permeabilidade, visto que o tempo de resposta mais longo e  
25 o sinal de potencial de escoamento muito baixo são dominados por variações da voltagem interfacial dos

eletrodos ao longo do tempo. Assim, a despeito das possibilidades teóricas apresentadas pela técnica anterior, o conhecimento convencional das pessoas versadas na técnica (da qual os comentários de Wong são indicativos) é que

5 medições úteis do potencial de escoamento não se acham disponíveis, devido aos baixos níveis de sinal, altos níveis de ruído, baixa resolução espacial, e baixa estabilidade de longo prazo.

Na verdade, é difícil obter dados transientes de

10 pressão com alta resolução espacial, já que o furo do poço é essencialmente uma região isobárica. O sensor de pressão colocado dentro do furo do poço não pode fornecer informações detalhadas sobre os transientes de pressão no interior da formação, se a formação for heterogênea. Para

15 fazer isso, é necessário segmentar o furo do poço em zonas hidraulicamente isoladas, uma tarefa de execução difícil e dispendiosa. Além disso, deverá ficar claro que algumas das ferramentas propostas da técnica anterior, mesmo se elas tivessem que funcionar como proposto, são de aplicação

20 extremamente limitada. Por exemplo, o dispositivo de Chandler irá funcionar somente em furos de poço perfurados antes do revestimento, e demanda que a ferramenta seja estacionada por um período de tempo em cada local, onde medições tiverem que ser feitas. Assim, o dispositivo de

25 Chandler não pode ser usado como um dispositivo e MWD/LWD (medição ou perfilagem durante a perfuração), não é

aplicável para poços acabados para fazer medições durante a produção, e nem pode ser usado em uma coluna móvel dos dispositivos de perfilagem.

#### SUMÁRIO DA INVENÇÃO

5 Assim, um objetivo da invenção é fornecer métodos e aparelho para medir potencial de escoamento em uma formação terrestre.

Outro objetivo da invenção é fornecer métodos e aparelho para medir potenciais de escoamento em uma  
10 formação durante a perfuração de um furo de poço.

Um objetivo adicional da invenção é fornecer métodos para determinar características da formação usando medições dos potenciais de escoamento.

Outro objetivo adicional da invenção é fornecer  
15 métodos para identificar condições de perfuração perigosas, tais como condições de perfuração sub-balanceada e/ou perda de fluido através de fraturas, usando medições do potencial de escoamento.

Outro objetivo da invenção é apresentar métodos  
20 para determinar permeabilidade da formação e/ou pressão da formação usando medições do potencial de escoamento.

De acordo com esses objetivos, que serão abaixo discutidos em detalhes, é fornecido um aparelho de perfuração com perfilagem e metodologias para medir  
25 potencial de escoamento em uma formação terrestre. Para os presentes fins, aplicações de perfuração com perfilagem

(LWD) e aplicações de perfuração com medição (MWD) serão consideradas de modo intercambiável. O aparelho e metodologias podem ser utilizados para localizar informações relevantes às operações de perfuração. De modo particular, visto que a medição do potencial de escoamento se refere diretamente ao fluxo de fluido, medições do potencial de escoamento podem ser usadas para rastrear fluxo de fluidos na formação. Por sua vez, essas informações podem ser usadas para localizar informações relevantes às operações de perfuração, tais como condições de perfuração sub-balanceada, pressões anormais na formação, fraturas abertas, a permeabilidade da formação, e pressão da formação.

Objetivos e vantagens adicionais da invenção tornar-se-ão óbvios para as pessoas versadas na técnica, através da referência à descrição detalhada tomada em conjunto com as figuras fornecidas.

#### BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A fig. 1 é um diagrama esquemático de uma coluna de perfuração, que é suspensa em um furo de poço em conjunto com o aparelho de perfuração com perfilagem que extrai medições do potencial de escoamento, de acordo com a presente invenção.

A fig. 2 é uma vista de seção transversal do conjunto do fundo de poço da coluna de perfuração, que incorpora uma modalidade exemplificante de um aparelho de

perfuração com perfilagem, de acordo com a presente invenção.

A fig. 3 é um esquema representando um modelo de avanço de um conjunto exemplificante do fundo de poço que  
5 incorpora um aparelho de perfuração com perfilagem, de acordo com a presente invenção.

A fig. 4 é um gráfico de um sinal oscilante do potencial de escoamento medido no eletrodo E1 e uma pressão superbalanceada para o modelo da fig. 3.

10 A fig. 5 é uma seção do gráfico da fig. 4 em uma escala de tempo expandida.

A fig. 6 é um diagrama esquemático das operações processadoras de sinal, que extraem os diversos componentes dos sinais do potencial de escoamento medidos pelo aparelho  
15 de perfuração com perfilagem das figs. 1, 2 e 3.

A fig. 7A é um gráfico de pressão em um ponto próximo à superfície do furo de poço.

A fig. 7B é um gráfico de pressão em um ponto interno da formação afastada da superfície do furo de poço.

20 A fig. 8 é um gráfico dos componentes CC, em fase e fora de fase do sinal de potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 em conjunto com uma pressão superbalanceada oscilante, que é gerada pelo modelo da fig. 3.

25 A fig. 9 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e

E4, com a junção isolante localizada três pés atrás da broca de perfuração, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 10 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e  
5 E4, com a junção isolante localizada cinco pés atrás da broca de perfuração, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 11 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e  
10 E4, com a junção isolante localizada doze pés atrás da broca de perfuração, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 12 é um gráfico dos componentes em fase e fora de fase do sinal do potencial de escoamento medido  
pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, com a junção isolante localizada três pés atrás da broca de perfuração, que é  
15 gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 13 é um gráfico dos componentes em fase e fora de fase do sinal do potencial de escoamento medido  
pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, com a junção isolante localizada cinco pés atrás da broca de perfuração, que é  
20 gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 14 é um gráfico dos componentes em fase e fora de fase do sinal do potencial de escoamento medido  
pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, com a junção isolante localizada doze pés atrás da broca de perfuração, que é  
25 gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 15 é um gráfico do componente CC do sinal do

potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4 sem uma junção isolante, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 16 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, em conjunto com uma condição de perfuração sub-balanceada, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 17 é um gráfico dos componentes em fase e fora de fase do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, em conjunto com uma condição de perfuração sub-balanceada, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 18 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, em conjunto com perfuração através de uma fratura aberta, que é fechada mais tarde por reboco, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 19 é um gráfico dos componentes em fase e fora de fase do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, em conjunto com perfuração através de uma fratura aberta, que é fechada mais tarde por reboco, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 20 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, em conjunto com perfuração através de uma fratura aberta, que não é fechada por reboco, que é gerado pelo

modelo da fig. 3.

A fig. 21 é um gráfico dos componentes em fase e fora de fase do sinal do potencial de escoamento medido pelos eletrodos E1, E2, E3 e E4, em conjunto com perfuração  
5 através de uma fratura aberta, que não é fechada por reboco, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 22 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de permeabilidades radiais variáveis e uma  
10 permeabilidade vertical de 100 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 23 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de permeabilidades verticais variáveis e uma  
15 permeabilidade radial de 100 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 24 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de permeabilidades verticais variáveis e uma  
20 permeabilidade radial de 4 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 25 é um gráfico das derivadas discretas do tempo de perfilagem do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de  
25 permeabilidades radiais variáveis e uma permeabilidade vertical de 100 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 26 é um gráfico das derivadas discretas do tempo de perfilagem do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de permeabilidades verticais variáveis e uma permeabilidade radial de 100 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 27 é um gráfico das derivadas discretas do tempo de perfilagem do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de permeabilidades verticais variáveis e uma permeabilidade radial de 4 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 28 é um gráfico da relação entre o componente fora de fase e o componente em fase do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de permeabilidades radiais variáveis e uma permeabilidade vertical de 100 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 29 é um gráfico da relação entre o componente fora de fase e o componente em fase do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de permeabilidades verticais variáveis e uma permeabilidade radial de 100 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 30 é um gráfico da relação entre o componente fora de fase e o componente em fase do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 sobre um conjunto de permeabilidades verticais variáveis e uma

permeabilidade radial de 4 mD, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 31 é um gráfico do componente CC do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 em conjunto  
5 com um grupo de valores de pressão superbalanceada, que é gerado pelo modelo da fig. 3.

A fig. 32 é um diagrama ilustrando operações ajustadoras de curva, que extraem uma estimativa da pressão da formação durante a perfuração, baseado na magnitude das  
10 medições do potencial de escoamento ao longo de um conjunto de pressões superbalanceadas variáveis.

A fig. 33 é um diagrama esquemático de uma ferramenta de perfuração com perfilagem e de uma broca de perfuração.

15 A fig. 34 é um diagrama esquemático de uma broca de perfuração e de uma ferramenta de perfuração com perfilagem, com todos os eletrodos isolados do restante da ferramenta.

As figs. 35A e 35B são diagramas esquemáticos de  
20 eletrodos múltiplos distribuídos em torno da circunferência de um comando de perfuração.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

Antes de fazer referência às figuras, algumas considerações teóricas governando a física da invenção são  
25 úteis. Em rochas de reservatório, existe uma fina camada dupla carregada na interface entre a matriz de rocha porosa

e a água na matriz de rocha porosa. Em condições típicas, a superfície da matriz é negativamente carregada, e a água é positivamente carregada. Quando a água se move sob um gradiente de pressão  $\nabla p$ , uma corrente elétrica  $i_e$  é criada com a corrente de água. A corrente elétrica é proporcional à corrente de água, que é proporcional ao gradiente de pressão:

$$i_e = L \nabla p, \quad (1)$$

onde  $L$  é uma constante de acoplamento, que é uma propriedade da rocha saturada com fluido.

Transientes de pressão são criados na formação por muitas operações distintas, que ocorrem ao longo do tempo de vida de um poço, tais como perfuração, invasão com lama, cimentação, injeção de água e ácido, fraturamento, e produção de petróleo e gás. Os testes do transiente de pressão constituem uma técnica estabelecida, para determinar propriedades do reservatório, como permeabilidade, tamanho de reservatório, e comunicação entre diferentes zonas e entre diferentes poços. Conforme abaixo descrito, transientes do potencial de escoamento associados aos transientes de pressão podem ser também usados, para determinar essas propriedades.

A modelagem da pressão de reservatório  $p$  pode ser realizada com modelos multifásicos de fluxo. Para a modelagem do potencial de escoamento, é útil iniciar com a equação de difusão de um fluxo monofásico:

$$\nabla \cdot k/\mu \nabla p = \phi c \partial/\partial t p \quad (2)$$

onde  $k$  é a permeabilidade,  $\mu$  é a viscosidade,  $\phi$  é a porosidade, e  $c$  é a compressibilidade de fluido.

Através do campo de pressão modelado  $p$ , o potencial  
5 de escoamento  $V$  pode ser calculado, pela resolução da Equação de Poisson:

$$-\nabla \cdot \sigma \nabla V = \nabla \cdot L \nabla p, \quad (3)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade elétrica.

A partir da equação (2), segue-se que o tempo  $\Delta t$   
10 para um transiente de pressão e o transiente do potencial de escoamento associado, criado na superfície do furo de poço para se difundir através de uma distância  $\Delta x$  dentro da formação, é dado por:

$$\Delta t \sim \phi c \mu / k (\Delta x)^2 \quad (4)$$

15 Os transientes prematuros do potencial de escoamento e da pressão são sensíveis principalmente às propriedades do reservatório próximo ao furo do poço, e os transientes atrasados são sensíveis às propriedades dos reservatórios próximo ao furo do poço e mais afastado do  
20 furo do poço. Através da interpretação dos transientes medidos de uma maneira cronológica, as propriedades do reservatório em diferentes distâncias para o furo do poço podem ser determinadas. A interpretação dos transientes de pressão, dessa maneira cronológica, é uma técnica  
25 estabelecida. Por exemplo, transientes prematuros de

pressão são usados para determinar danos às permeabilidades na crosta, e transientes atrasados de pressão são usados para determinar limites de reservatório. Conforme abaixo citado, transientes do potencial de escoamento associados aos transientes de pressão podem ser usados para determinar essas propriedades.

As aplicações são muito mais limitadas, se os valores constantes dos potenciais de escoamento forem as únicas medições disponíveis. Em um estado constante, a equação (2) se torna

$$\nabla \cdot k/\mu \nabla p = 0 \quad (5)$$

A queda de pressão  $\Delta p$  ao longo de um intervalo de profundidade  $\Delta x$  é então proporcional a

$$\Delta p \propto \mu/k \Delta x \quad (6)$$

A queda no potencial de escoamento  $\Delta x$  é relacionada ao  $\Delta p$  por

$$\Delta V = - L/\sigma \Delta p, \quad (7)$$

que é proporcional a

$$\Delta V \propto L\mu/\sigma k \Delta x. \quad (8)$$

O potencial de escoamento constante somente pode prestar informações sobre o valor médio de uma propriedade de reservatório e, como resultado, é dominado por intervalos com altos valores de  $(L\mu)/(\sigma k)$ . Acredita-se que, na presença de um reboco, o potencial de escoamento constante seja dominado pelo reboco, e seja insensível às

propriedades do reservatório. A permeabilidade do reboco é extremamente baixa, e a queda de pressão contínua existe principalmente através do reboco.

Embora, em princípio, seja possível determinar as  
5 propriedades do reservatório em todas as distâncias até o furo do poço (isto é, radialmente a partir do furo do poço) pela interpretação dos transientes de um modo cronológico, a questão crítica na prática é se as medições podem ser feitas com suficiente qualidade: precisão, resolução  
10 espacial, e estabilidade durante longo tempo. É difícil obter dados do transiente de pressão com alta resolução espacial, já que o furo do poço é essencialmente uma região isobárica. Um sensor de pressão colocado dentro do furo do poço não pode prestar informações detalhadas sobre os  
15 transientes de pressão dentro da formação, se a formação for heterogênea. Para fazer isso, será necessário segmentar o furo do poço em zonas hidraulicamente isoladas, uma tarefa de execução difícil e dispendiosa. Por outro lado, o furo do poço não é uma superfície equipotencial para fluxo  
20 de corrente elétrica. Assim, transientes do potencial de escoamento podem ser medidos por um arranjo de eletrodos posicionados dentro do furo do poço e eletricamente isolados um do outro, e podem prestar informações equivalentes a estes, dos testes de transientes de pressão  
25 da zona hidraulicamente isolada, porque o potencial de escoamento é determinado pelo gradiente de pressão. Na

verdade, pela utilização de um arranjo de eletrodos com potencial de escoamento isolado, o potencial de escoamento pode ser medido com uma maior resolução espacial, do que os testes do transiente de pressão da zona hidraulicamente isolada.

As propriedades da formação variam de local a local (inomegeneidade) e podem também variar com a direção em um determinado local (anisotropia). Em decorrência disso, o potencial de escoamento em uma profundidade particular pode variar em torno da circunferência do furo do poço. Por exemplo, uma fratura, que atravessasse o furo do poço em um ângulo oblíquo, pode produzir mudanças significativas no potencial de escoamento com o azimuth. Outro exemplo é a anisotropia da permeabilidade, que modifica a distribuição resultante de um transiente de pressão. Visto que a distribuição de fluxo afeta o potencial de escoamento, a anisotropia da permeabilidade pode também produzir variações azimutais no potencial de escoamento. Assim, medições azimutais do potencial de escoamento podem ser interpretadas, para determinar a inomegeneidade e a anisotropia das propriedades da formação.

Após a citação dos entendimentos teóricos acima, de acordo com o aspecto da invenção, são fornecidos um aparelho e método para medir potenciais de escoamento durante a perfuração de um furo de poço. De modo particular, durante a perfuração, uma diferença de pressão

entre a formação e o furo do poço cria invasão de lama e transientes de pressão e, assim, transientes do potencial de escoamento. Em poços perfurados com uma lama baseada em petróleo, um potencial de escoamento irá existir, se a lama  
5    contiver uma fração de água.

Com relação agora à fig. 1, é mostrada uma ilustração esquemática de um furo de poço 10 perfurado em uma formação 12 por um aparelho de perfuração rotativa, que emprega uma ferramenta de medição do potencial de  
10    escoamento da perfuração com avaliação, de acordo com a presente invenção. O aparelho de perfuração inclui uma coluna de perfuração 14 composta de um número de seções do comando de perfuração tubulares interconectadas (incluindo as seis mostradas como 15A, 15B, 15C, 15D, 15E e 15F),  
15    sustentando, na sua extremidade inferior, um comando de perfuração 16 terminado por uma broca de perfuração 17. Na superfície, a coluna de perfuração 14 é sustentada e girada por aparelho padrão (não mostrado), girando assim a broca de perfuração 17 para avançar a profundidade do furo do  
20    poço 10.

Um fluxo de recirculação de fluido ou lama de perfuração é utilizado para lubrificar a broca de perfuração 17 e para conduzir frações residuais e fragmentos de perfuração até a superfície 18. Por  
25    consequente, o fluido de perfuração é bombeado para baixo do furo do poço 10 e flui pelo interior da coluna de

perfuração 14 (conforme indicado pela seta 19), saindo a seguir pelos orifícios (não mostrados) na broca de perfuração 17. O fluido de perfuração saindo pela broca de perfuração 17 circula para cima (conforme indicado pelas  
5 setas 20) na região entre o exterior da coluna de perfuração 14 e a periferia 21 do furo do poço, que é normalmente chamado de espaço anular.

A porção inferior da coluna de perfuração 14, incluindo a broca de perfuração 17, o comando de perfuração  
10 16, e pelo menos uma seção tubular do comando de perfuração conectada ao comando de perfuração 16 (p. ex., seção do comando de perfuração 15F), é chamada de composição de fundo 100. De acordo com a presente invenção, a composição de fundo 100 inclui capacidades para medir o potencial de  
15 escoamento durante a perfuração, conforme abaixo descrito em mais detalhes. As medições durante a perfuração são observadas no furo do poço 10, com a composição de fundo 100 localizada no furo do poço durante as operações de perfuração, pausa, manobra, ou outras mais.

20 Conforme mostrado na seção transversal da fig. 2, a composição de fundo 100 inclui uma série de elementos interconectados, incluindo a seção tubular do comando de perfuração 15F, o comando de perfuração 16 e a broca de perfuração 17. A seção do comando de perfuração 15F inclui  
25 um corpo metálico 101 e três eletrodos anulares externos 102-1, 102-2, 102-3, que são longitudinalmente afastados

entre si e montados sobre um meio isolante adequado (p. ex., coxins isolantes 103-1, 103-2, 103-3), que isola eletricamente os eletrodos do corpo metálico 101. A seção do comando de perfuração 15F ainda inclui um sensor de  
5 pressão 104 montado sobre ela para medir a pressão no fundo do poço.

A broca de perfuração 17 é interconectada com o fundo do comando de perfuração 16 por um acoplamento roscado 105. O topo do comando de perfuração 16 é  
10 interconectado com o fundo da seção do comando de perfuração 15F por uma junção isolante 106, que isola eletricamente o corpo metálico da seção do comando de perfuração 15F, do comando de perfuração 16 e da broca de perfuração 17. A junção isolante 106 permite que o corpo  
15 metálico do comando de perfuração 16 e da broca de perfuração 17, coletivamente, seja usado como um eletrodo de medição para medições do potencial de escoamento e também permite que o corpo metálico 101 da seção do comando de perfuração seja usado como um eletrodo de referência de  
20 voltagem para medições do potencial de escoamento, conforme abaixo descrito em mais detalhes. Na modalidade preferida, um dos eletrodos (102-1) está localizado adjacente (ou sobre) a junção isolante 106. Nesta configuração, a corrente de escoamento elétrico, criada pela perda de  
25 esguicho na broca de perfuração 17, é forçada a fluir mais para fora da formação 12 e para dentro da coluna de

perfuração acima da junção isolante 106. Com o eletrodo 102-1 colocado adjacente (ou sobre) a junção isolante 106, ele terá um forte sinal, mesmo se existir uma boa distância atrás da broca de perfuração 17.

5           Um chassi anular 107 se encaixa dentro da seção de comando de perfuração 15F e do comando de perfuração 16. O chassi anular não fornece um curto circuito elétrico entre a seção do comando de perfuração 15F, e o comando de perfuração 16. De preferência, o chassi anular termina na  
10 junção isolante, e um cabo isolado conecta a eletrônica no interior do chassi anular ao comando de perfuração 16. De modo alternativo, se uma porção do chassi anular se estender abaixo da junção isolante, ela é feita de um material não condutor (por exemplo, feita de epóxi de fibra  
15 de vidro). O chassi anular 107 aloja a fiação, que é eletricamente acoplado através de furos isolados de passagem (não mostrados) aos eletrodos 102-1, 102-2, 102-3, o sensor de pressão 104, o corpo metálico do comando de perfuração/ broca de perfuração (que é usado como um  
20 eletrodo de medição para medições do potencial de escoamento), e o corpo metálico 101 da seção de comando de perfuração 15F (que é usada como um eletrodo de referência para medições do potencial de escoamento). O fluido de perfuração escoar através do centro do chassi anular 107,  
25 conforme mostrado pelas setas 108. O chassi anular 107 também inclui, de preferência, componentes eletrônicos de

interface e de telemetria, que são ligados a um sistema de telemetria dos pulsos de lama MWD localizado em um comando de perfuração separado. O sistema de telemetria dos pulsos de lama MWD gera ondas de pressão oscilantes, que se  
5 propagam para cima no interior da coluna de perfuração, e que são detectadas por um sensor de pressão montado na sonda de perfuração. O sistema de telemetria dos pulsos de lama codifica as medições no fundo do poço, que são decodificados pelo equipamento de processamento de dados  
10 localizado na superfície (p. ex., um processador e armazenamento de dados associados). O equipamento de processamento de dados recebe sinais de dados representativos dos potenciais de escoamento medidos pelos eletrodos, bem como sinais de dados representativos da  
15 pressão medida pelos sensores de pressão. Tais sinais de dados são analisados, para obter produtos de resposta, conforme abaixo discutido.

Os valores do potencial de escoamento medidos pelos eletrodos são leituras de voltagem passiva, que podem ser  
20 feitas em um furo de poço altamente resistivo, pelo uso de componentes eletrônicos de alta impedância. Em poços perfurados com lama a base de petróleo, os eletrodos precisam ser o mais largo possível, e colocados o mais próximo possível da formação, para reduzir a impedância do  
25 eletrodo.

Deverá ser apreciado pelas pessoas versadas na

técnica que, a fim de analisar corretamente os sinais de dados obtidos dos eletrodos e/ou do sensor de pressão da composição de fundo 100, um modelo de reboco desenvolvido durante a perfuração deve ser incluído no modelo de avanço.

5 Lamas de perfuração são projetadas para impedir perdas significativas de fluido do furo de poço, pela formação de uma barreira praticamente impermeável (reboco) na parede do furo do poço. O reboco consiste de argilas e partículas finas, que são deixadas para trás, quando a lama invade uma

10 formação permeável. Modelos exatos da formação de reboco e da filtração de lama, tais como divulgados em E. J. Fordham e H. K. J. Ladva, "Filtração com Fluxo Cruzado das Suspensões de Bentonita", Hidrodinâmica Físico-química, 11(4), 411-439 (1989), podem ser utilizados. Com um modelo

15 apropriado, as informações do potencial de escoamento obtidas dos eletrodos e/ou sensor de pressão da composição de fundo 100 podem produzir vários produtos de resposta, que são aplicáveis a uma ampla variedade de aplicações, tais como segurança de perfuração e avaliação da formação.

20 Por exemplo, as aplicações dentro da segurança de perfuração inclui a detecção prematura da condição sub-balanceada em zonas sobrepressurizadas, a detecção prematura da perda de fluido através de fraturas e falhas, e a estimativa da pressão da formação. Em outros exemplos,

25 as aplicações dentro da avaliação da formação incluem a estimativa de permeabilidade da formação e a avaliação de

fraturas.

Um modelo exemplificante é ilustrado no diagrama esquemático da fig. 3. Nesse modelo, o eletrodo 102-1 (abaixo chamado de eletrodo E2) está localizado no ponto médio de uma junção isolante 106 com 0,5 pés de extensão, com os eletrodos 102-2 e 102-3 (abaixo chamados, respectivamente, de eletrodos E3 e E4) localizados no ponto médio das seções isolantes de superfície com 1 pé de extensão 102-2 e 102-3, que são deslocadas respectivamente a 1 pé e 4 pés do topo da junção isolante 106. Três extensões distintas (3 pés, 5 pés e 12 pés) do comando de perfuração 16 são usadas. O comando de perfuração/ broca de perfuração é abaixo chamada de eletrodo E1. O corpo metálico da seção de comando de perfuração 15F define um eletrodo de referência. O furo do poço é um poço vertical. A condutividade da formação é de 1 S/m, a condutividade do espaço anular é de 10 S/m, e a condutividade do comando de perfuração 16 e da broca perfuração 17 é de  $10^7$  S/m. A bomba de lama e a telemetria dos pulsos de lama fazem com que a pressão no fundo do poço oscile. O sistema de telemetria dos pulsos de lama pode criar pulsos de pressão de poucas centenas de psi (libras por polegada quadrada) em frequências abaixo de 1 Hz a acima de 20 Hz. A diferença entre a pressão no fundo do poço e a formação é considerada ser

$$p = p_0 + p_1 \text{ sen}(2\pi t/T)$$

onde a pressão inicial  $p_0$  é suposta ser de 500 psi como um exemplo de perfuração superbalanceada, e é suposta ser de -500 psi como um exemplo de perfuração sub-balanceada. A pressão oscilante a partir do sistema de telemetria dos pulsos de lama é  $p_1$ , que é suposta ser de 35 psi, e o período do sinal dos pulsos de lama é  $T$ , que suposto ser de 1 segundo. Nos exemplos a seguir, a velocidade de penetração da broca de perfuração é suposta ser constante a 33 pés/h, até que a perfuração cesse. A broca de perfuração e os comandos de perfuração localizados acima dela são supostos estarem em uma formação impermeável (12A da fig. 1) até o tempo  $t = 0$ , quando a broca de perfuração corta uma formação permeável (12B da fig. 1). Para tempos  $t < 0$ , não existe nenhum potencial de escoamento, pois não existe nenhum fluido fluindo para dentro ou para fora da formação impermeável. Para tempos  $t > 0$ , o fluido no furo do poço flui para dentro da formação permeável (situação superbalanceada), ou o fluido da formação permeável flui para dentro do furo do poço (situação sub-balanceada). A quantidade de formação permeável exposta ao furo do poço é dada pela velocidade de penetração multiplicada pelo tempo  $t$ . No tempo  $t = 800$  segundos, a perfuração cessa com a broca de perfuração tendo penetrado 7,3 pés na formação permeável; mas a bomba de lama e a telemetria de pulsos da lama continuam a operar. No caso superbalanceado, um reboco continua a se formar e reduz o fluxo de fluido dentro da

formação. No caso sub-balanceado, o fluido continua a fluir para fora da formação, visto que o reboco não pode se formar.

Um sinal do potencial de escoamento oscilante pode ser extraído de uma medição da voltagem diferencial (bloco 601 da fig. 6) entre o eletrodo de referência e um dos quatro eletrodos (p. ex., E1, E2, E3, ou E4), que é aqui chamado de "eletrodo medidor". Por exemplo, um sinal do potencial de escoamento oscilante extraído do comando de perfuração/ broca de perfuração (eletrodo E1) e uma pressão superbalanceada é mostrado no gráfico da fig. 4. Uma seção da fig. 4 é mostrada em escala de tempo expandida na fig. 5. Entre o tempo  $t = 0$  e  $t = 800$  segundos, a broca de perfuração corta a formação permeável (12B). No  $t = 800$  segundos, os eletrodos E1, E2 e E3 estão na formação permeável, enquanto que o E4 permanece na formação impermeável.

No caso superbalanceado, o filtrado de lama invade a formação permeável, produzindo um potencial de escoamento. A maior parte da invasão ocorre na face de corte da broca de perfuração, que remove continuamente o reboco. Atrás da face de corte da broca de perfuração, reboco é formado na parede do furo do poço e inibe uma invasão adicional. Quando a perfuração cessa a  $t = 800$  segundos, a invasão também cessa, e o potencial de escoamento diminui rapidamente.

No caso sub-balanceado, fluidos da formação escoam para dentro do furo do poço ao longo de toda a sua extensão na formação permeável, bem como na face de corte da broca. Devido ao fato do reboco não poder se formar, o potencial  
5 de escoamento não diminui após a perfuração cessar.

De modo alternativo, componentes distintos de CC e CA do sinal do potencial de escoamento oscilante podem ser adquiridos, conforme mostrado na fig. 6. O componente CC é adquirido no bloco 602, por mediação da saída de sinal do  
10 potencial de escoamento oscilante, através da medição da voltagem diferencial do bloco 601 ao longo do tempo. O componente CA é adquirido no bloco 603 por filtragem do componente CC (e de outros componentes indesejados) da saída de sinal do potencial de escoamento oscilante, pela  
15 medição da voltagem diferencial do bloco 601. Além disso, o componente em fase e o componente fora de fase do sinal de potencial de escoamento (chamados a seguir de componentes CA) podem ser adquiridos no bloco 605, pela detecção síncrona do componente CA do sinal do potencial de  
20 escoamento (saída pelo bloco 603) com o componente CA da pressão no fundo do poço medida pelo sensor de pressão (saída pelo bloco 604). O componente CA da pressão no fundo do poço é adquirido no bloco 604, pela filtragem do componente CC (e de outros componentes indesejados) da  
25 saída do sinal de pressão pela pressão. De modo importante, a CA do sinal do potencial de escoamento oscilante está

menos sujeita a contaminação por ruído, do que os componentes CC do sinal do potencial de escoamento oscilante.

A origem do componente fora de fase do sinal do potencial de escoamento pode ser entendida da seguinte maneira. A pressão oscilante no fundo do poço será difundida para dentro da formação. Em um ponto interior na formação, a pressão terá uma diferença de fase com a pressão no fundo do poço. A diferença de fase depende da distância até o furo do poço e da permeabilidade da formação e das propriedades do fluido. A corrente de escoamento em um ponto interior estará em fase com o gradiente de pressão nesse ponto, e terá uma diferença de fase com a pressão no fundo do poço. A corrente de escoamento em cada ponto interior fornece uma contribuição para o potencial de escoamento no eletrodo medidor; a contribuição está em fase com o gradiente de pressão no ponto interior. O potencial de escoamento no eletrodo medidor é a integridade das contribuições de todos os pontos na formação. Assim, existirá um componente fora de fase do sinal do potencial de escoamento.

Visto que a pressão é governada pela equação de difusão, ao invés da equação de ondas, a resposta da pressão a certa distância afastada da fonte se torna difusa. Em grandes distâncias de afastamento, as informações detalhadas sobre a fonte, espaciais e

cronológicas, serão perdidas na pressão. Assim, a parte oscilante da pressão deve diminuir com a crescente distância até a fonte de perturbação da pressão. A pressão em um ponto próximo à superfície do furo de poço é plotada na fig. 7A, e a pressão correspondente em um ponto interior da formação afastado da superfície do furo de poço é plotada na fig. 7B. Pode ser visto que a amplitude da parte oscilante, como um percentual da parte CC, é reduzida significativamente, quando uma delas se afasta da fonte.

10 Por conseguinte, o componente CA do potencial de escoamento possui profundidades mais rasas de investigação, do que o componente CC.

Os componentes CC, em fase CA, e fora de fase CA de um sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 são mostrados na fig. 8. Os componentes em fase e fora de fase são plotados em diferentes escalas pelo componente CC, com os componentes CA multiplicados por um fator de 10 para fins de clareza. Esses componentes CA saturam mais cedo, do que o componente CC, e descem mais rapidamente, quando a perfuração cessa. Estas propriedades refletem a natureza de curta amplitude dos componentes CA de sinal do potencial de escoamento.

15  
20

A diferença de fase entre a pressão no fundo do poço e o potencial de escoamento depende da permeabilidade da formação. O uso potencial da diferença de fase na determinação da permeabilidade da formação será discutido

25

mais tarde.

Os sinais do potencial de escoamento medidos pelos quatro eletrodos E1, E2, E3 e E4 são dependentes das posições dos eletrodos ao longo da coluna de perfuração, bem como da posição da junção isolante 16 ao longo da coluna de perfuração. Os sinais do potencial de escoamento nos quatro eletrodos são mostrados para condições superbalanceadas nas figs. 9 - 15. A junção isolante 106 está localizada a diferentes distâncias da broca de perfuração 17 nessas figuras.

Os componentes de sinal CC são mostrados respectivamente na figs. 9, 10 e 11. O aumento do espaçamento entre a broca de perfuração 17 e a junção isolante 106, de 3 pés para 12 pés, não provoca uma grande queda na amplitude do sinal CC. A amplitude do sinal para o eletrodo E1 é de cerca de 38 mV para um espaçamento de 3 pés, e de cerca de 23 mV para um espaçamento de 12 pés entre a broca e a junção isolante. A amplitude de sinal do eletrodo E2 é de cerca de 19 mV para o espaçamento de 3 pés, e de 12 mV para um espaçamento de 12 pés. Observe também que o eletrodo E2 está no leito permeável para o espaçamento de 3 pés, mas está no leito impermeável para espaçamento de 12 pés. Esta lenta diminuição nas amplitudes do sinal CC ocorre, porque a broca de perfuração 17 e o comando de perfuração 16 formam uma superfície equipotencial e conduzem passivamente a corrente elétrica

do potencial de escoamento para longe do furo do poço. A junção isolante 106 força a corrente elétrica de escoamento a retornar para a seção 15F do comando de perfuração atrás da junção isolante 106. Isto também explica o motivo das  
5 amplitudes CC diminuírem lentamente do E1 para o E2. Após a corrente elétrica de escoamento fluir até além da junção isolante 106, ela retorna rapidamente para o comando de perfuração 15F. Isto explica o motivo da amplitude no eletrodo E3 ser muito menor do que no E2.

10 Os componentes de sinal CA são mostrados respectivamente nas figs. 12, 13 e 14. As amplitudes dos componentes CA diminuem lentamente com o aumento da distância entre a broca de perfuração e a junção isolante.

Os componentes de sinal CC calculados sem a junção  
15 isolante 106 são mostrados na fig. 15. Comparando as figs. 15 e 9, as amplitudes sem a junção isolante são 40 vezes menores, do que com uma junção isolante. Assim, uma junção isolante é, de preferência, incluída no projeto da ferramenta, a fim de oferecer boa intensidade de sinal.

20 As figs. 9 - 15 mostram que medições exatas dos sinais do potencial de escoamento podem ser obtidas, de preferência, com uma junção isolante localizada na coluna de perfuração. A junção isolante 106 não precisa ser localizada imediatamente atrás da broca de perfuração 17.  
25 Observe que, quando a distância entre a junção isolante 106 e a broca de perfuração 17 aumentou de 3 pés para 12 pés, a

magnitude do potencial de escoamento diminuiu somente em um fator de 2. Assim, é contemplado que a junção isolante 106 pode ser colocada de 20 a 30 pés atrás da broca de perfuração 17, se desejado. Isto permite que um sistema de  
5 perfuração direcional possa ser localizado imediatamente acima da broca de perfuração, e que a junção isolante seja colocada acima do sistema de perfuração direcional. Esta é uma consideração prática importante, visto que a maioria dos poços offshore necessitam de um sistema de perfuração  
10 direcional imediatamente acima da broca de perfuração.

De acordo com o aspecto da presente invenção, os sinais do potencial de escoamento, medidos por um ou mais dos quatro eletrodos E1, E2, E3, E4 da composição 100, podem ser usados para detectar condições sub-balanceadas de  
15 perfuração, o que é crítico para a segurança da perfuração. Normalmente, uma condição superbalanceada é mantida durante a perfuração. Se uma formação com pressão inesperadamente alta for encontrada, de forma que exista uma condição sub-balanceada, o sondador precisa tomar medidas imediatas para  
20 impedir uma "explosão". Uma "explosão" pode resultar na perda do poço, danos ambientais, e potencialmente na perda de vidas. A fig. 16 mostra os componentes de sinal CC dos sinais do potencial de escoamento com a junção isolante 106 localizada a 3 pés atrás da broca de perfuração 17. A fig.  
25 17 mostra os componentes de sinal CA. A detecção de condições sub-balanceadas de perfuração pode ser

simplesmente extraída dos sinais CC, pela detecção de uma inversão de sinal nos sinais CC. Nas figs. 9 e 16, o sinal de um sinal CC é negativo para condições superbalanceadas de perfuração, e positivo para condições sub-balanceadas de perfuração. O sinal CC irá de negativo para positivo, quando ocorrer uma transição nas condições de perfuração, de superbalanceadas para sub-balanceadas.

De modo alternativo, os componentes de sinal CA podem ser usados para detectar condições sub-balanceadas de perfuração. Comparando as figs. 12 e 17, não existe nenhuma inversão de sinal nos componentes CA, quando ocorrer uma transição das condições de perfuração, de superbalanceadas para sub-balanceadas. Porém, a duração de tempo do período de subida do potencial de escoamento após penetrar na zona permeável é muito diferente nas duas figuras. No caso superbalanceado, reboco se forma rapidamente na parede do furo do poço acima da broca de perfuração, e reduz a quantidade de invasão do filtrado de lama atrás da face de corte da broca de perfuração. Assim, uma filtragem significativa somente corre na face de corte. O aumento da extensão do furo de poço na formação permeável 12B não aumenta a taxa de filtragem. Na situação sub-balanceada, reboco não pode se formar. Assim, a quantidade do filtrado de lama aumenta com a elevação da extensão do furo do poço na formação permeável. Além disso, quando a perfuração é cessada em  $t = 800$  segundos, os componentes de sinal CA

diminuem rapidamente para condições superbalanceadas de perfuração (fig. 12), muito embora fluido de perfuração continue a circular, mas permanecem estacionários para condições sub-balanceadas de perfuração (fig. 17).

5 Novamente, o rápido desenvolvimento de reboco no caso superbalanceado explica o motivo do potencial de escoamento diminuir rapidamente em  $t = 800$  segundos. Considerando o caso sub-balanceado, o fluido continua a fluir da formação para o furo do poço. Por último, os componentes de sinal CA  
10 no eletrodo E3 permanecem muito pequenos para condições superbalanceadas de perfuração (fig. 12), mas aumentam de modo significativo (p. ex., em  $t = 600$  seg) para condições sub-balanceadas de perfuração (fig. 17). De acordo com a presente invenção, uma ou mais destas propriedades podem  
15 ser usadas como critérios de detecção para condições sub-balanceadas de perfuração.

De acordo com outro aspecto da presente invenção, os sinais do potencial de escoamento medidos por um ou mais dos quatro eletrodos E1, E2, E3, E4 da composição 100 podem  
20 ser usados para detectar fraturas abertas, o que é crítico para a segurança da perfuração. De modo particular, pode haver uma perda instantânea de fluido através de fraturas naturais ou induzidas durante a perfuração, resultando em circulação perdida e pressões potencialmente e  
25 perigosamente baixas no furo do poço. Neste caso, o potencial de escoamento irá aumentar rapidamente, conforme

fluidos correm para dentro da formação através das fraturas abertas. Essa perda de fluido somente será observada muito mais tarde na superfície. A fig. 18 mostra os componentes de sinal CC com a junção isolante 106 localizada a 3 pés

5 atrás da broca de perfuração 17 em conjunto com uma fratura aberta, que é mais tarde fechada com reboco. A fig. 19 mostra os componentes de sinal CA. A fig. 20 mostra os componentes de sinal CC, se a fratura não for fechada com reboco, e a fig. 21 mostra os componentes de sinal CA. A

10 fratura é uma fina zona de alta permeabilidade, e é penetrada pela broca de perfuração em  $t = 320$  segundos. Conforme é evidenciado nas figs. 18 - 21, o fluxo de fluido aumenta, conforme a fratura é perfurada, o que resulta em sinais de grande potencial de escoamento CC e CA nos

15 eletrodos E1 e E2. Os componentes CC são 40 vezes maiores para o eletrodo E1 com a fratura, do que com a formação permeável (fig. 9). Da mesma forma, os componentes de sinal CA são significativamente maiores para o eletrodo E1 com a fratura, do que com a formação permeável (fig. 12). Quando

20 a fratura for mais tarde fechada com reboco (em  $t = 380$  segundos nas figs. 18 e 19), os componentes CC e os componentes CA retornam a seus valores estacionários, após a broca de perfuração ultrapassar a fratura. Quando a fratura não for fechada com reboco (figs. 20 e 21), não

25 existe nenhum decréscimo, quando a broca de perfuração abandonar a fratura. De acordo com a presente invenção,

estas propriedades podem ser usadas como critérios de detecção para uma fratura aberta, que é também crítico para a segurança da perfuração.

De acordo com outro aspecto ainda da presente  
5 invenção, os sinais do potencial de escoamento medidos por um ou mais dos quatro eletrodos E1, E2, E3, E4 da composição 100 podem ser usados para caracterizar a permeabilidade radial e a permeabilidade vertical da formação. Após a perfuração ser interrompida, reboco se  
10 forma rapidamente para cessar a perda de fluido em uma situação superbalanceada. Os sinais do potencial de escoamento diminuem com o tempo, conforme o gradiente de pressão é difundido para dentro da formação. O declínio é rápido para formações de alta permeabilidade e lento para  
15 formações de baixa permeabilidade. A fig. 22 mostra o componente CC medido pelo eletrodo E1 para cinco valores distintos de permeabilidade radial, com uma permeabilidade vertical de 100 mD. Pode ser visto que a taxa de declínio é bastante sensível à permeabilidade radial. A fig. 23 mostra  
20 o componente CC medido pelo eletrodo E1 para cinco valores distintos de permeabilidade vertical, com uma permeabilidade radial de 100 mD. A fig. 24 mostra o componente CC medido pelo eletrodo E1 para cinco valores distintos de permeabilidade vertical, com a permeabilidade  
25 radial fixada em 4 mD. Para melhor visualização da sensibilidade da taxa de declínio à permeabilidade, as

derivadas discretas do tempo de perfilagem (a diferença entre os componentes CC nos pontos de amostragem em dois tempos dividida pelo componente CC no ponto de amostragem no tempo médio) são mostradas nas figs. 25 - 27, onde o  
5 intervalo de tempo é um curto intervalo em torno de 800 segundos, quando a perfuração cessa. A sensibilidade do componente CC para a permeabilidade radial da formação está isenta das separações relativamente grandes entre as curvas da fig. 25. A insensibilidade do componente CC à  
10 permeabilidade vertical, com a permeabilidade radial fixada em 100 mD, está isenta das separações relativamente pequenas entre as curvas da fig. 26. E a insensibilidade do componente CC à permeabilidade vertical, com a permeabilidade radial fixada em 4 mD, está isenta das  
15 separações relativamente pequenas entre as curvas da fig. 27. A partir dessas propriedades, pode ser concluído que, após a perfuração cessar e o reboco se formar, a relaxação da pressão em excesso próxima ao furo do poço é essencialmente em uma direção radial.

20 A fig. 28 ilustra a relação entre o componente fora de fase e o componente em fase (isto é, a tangente do ângulo de fase) do sinal do potencial de escoamento CA medido pelo eletrodo E1 para cinco valores distintos da permeabilidade radial, com a permeabilidade vertical fixada  
25 em 100mD. A fig. 29 ilustra a tangente do ângulo de fase do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1

para cinco valores distintos da permeabilidade vertical, com a permeabilidade radial fixada em 100mD. E a fig. 30 ilustra a tangente do ângulo de fase do sinal do potencial de escoamento medido pelo eletrodo E1 para cinco valores  
5 distintos da permeabilidade vertical, com a permeabilidade radial fixada em 4mD. Pode ser visto que a tangente do ângulo de fase do sinal do potencial de escoamento é sensível à permeabilidade radial e à permeabilidade vertical. Em todas as três figuras 28 - 30, o valor  
10 absoluto da tangente do ângulo de fase diminui, conforme a permeabilidade aumenta. No limite da permeabilidade infinita (ou compressibilidade zero), a resposta da pressão dentro da formação às variações de pressão no furo do poço é instantânea. As fontes das correntes de escoamento dentro  
15 da formação estão sempre em fase com a pressão no furo do poço. O ângulo de fase se aproxima de zero, quando a permeabilidade se aproxima do infinito.

Visto que as taxas de declínio e as tangentes do ângulo de fase possuem diferentes sensibilidades para a  
20 permeabilidade radial e para a permeabilidade vertical, é possível estimar a permeabilidade radial e a permeabilidade vertical, com os componentes CC e CA combinados. Através da minimização da diferença entre os valores medidos e calculados, a permeabilidade radial e a permeabilidade  
25 vertical são estimadas.

Se o componente de sinal CC do sinal do potencial

de escoamento estiver indisponível, é possível estimar a permeabilidade da formação com os componentes CA em separado. Nesta análise, uma hipótese é feita quanto à relação entre a permeabilidade radial e a permeabilidade vertical.

De acordo com outro aspecto ainda da presente invenção, os sinais do potencial de escoamento medidos por um ou mais dos quatro eletrodos E1, E2, E3 e E4 da composição 100 podem ser usados para estimar a pressão da formação. A fig. 31 mostra o componente CC do sinal do potencial de escoamento medido no eletrodo E1 para três pressões superbalanceadas distintas (500 psi, 400 psi, e 300 psi). A pressão no furo do poço pode ser variada pelo controle da taxa das bombas de lama, por variação do peso da lama de perfuração, ou pela manobra da coluna de perfuração para dentro (ou para fora) do furo do poço. Fica evidente através da fig. 31, que os sinais do potencial de escoamento CC são proporcionais à pressão superbalanceada. Assim, a pressão da formação pode ser estimada, pela medição dos componentes CC do potencial de escoamento em uma pluralidade de pressões distintas no furo do poço. As magnitudes do potencial de escoamento para as diferentes pressões superbalanceadas são ajustadas em uma linha reta, de acordo com a lei de Darcy. Essa linha reta é extrapolada, a fim de determinar a pressão da formação no potencial de escoamento zero. Essa pressão (a pressão no

potencial de escoamento zero) é a pressão da formação. O método de estimativa é mostrado, de forma esquemática, na fig. 32. A estimativa da pressão da formação durante a perfuração é extremamente importante para a segurança da  
5 perfuração.

De acordo com outro aspecto ainda da presente invenção, os sinais do potencial de escoamento medidos por um ou mais dos quatro eletrodos E1, E2, E3 e E4 da composição 100 podem ser também usados para a detecção  
10 antecipada de pressões anormais na formação. Por exemplo, se a pressão da formação se tornar maior do que a pressão no furo do poço, o sinal do componente CC dos sinais do potencial de escoamento será invertido. Essa inversão de sinal será observável, antes que fluido suficiente tenha  
15 escoado para dentro do furo do poço, para que a variação de pressão seja diretamente observável. O acúmulo da inversão de fluxo pode ocorrer durante um período de tempo curto, mas finito, conforme a zona com pressão anormal estiver sendo perfurada. Qualquer inversão de fluxo será  
20 imediatamente observável no componente CC das medições do potencial de escoamento. Assim, as medições do potencial de escoamento do componente CC possuem valor na detecção antecipada da pressão anormal na formação. Devido ao fato da medição de escoamento ser feita em um ponto muito  
25 próxima à broca de perfuração, isto fornece o alerta mais antecipado possível de uma formação superpressurizada.

Uma modalidade preferida de uma ferramenta LWD 100', projetada para medir potencial de escoamento, é mostrada na fig. 33. A broca de perfuração 17' é fixada na seção 16' do comando de perfuração da ferramenta LWD 100' por um acoplamento 105'. O topo do comando de perfuração 16' é interconectado com o fundo da seção 15 F' do comando de perfuração por uma junção isolante 106', que isola eletricamente o corpo metálico da seção 15 F' de comando de perfuração, do comando de perfuração 16' e da broca de perfuração 17'. A junção isolante 106' permite que o corpo metálico do comando de perfuração 16' e da broca de perfuração 17', coletivamente, seja usado como um eletrodo medidor para medições do potencial de escoamento, e também permite que o corpo metálico 101' da seção 15 F' do comando de perfuração seja usado como um eletrodo de referência de voltagem para medições do potencial de escoamento, conforme aqui descrito. A lama de perfuração 108' passa pelo interior da ferramenta LWD e da broca de perfuração 17', para lubrificar a broca de perfuração 17' e para remover cascalhos. Um sensor de pressão 104' mede a pressão no furo do poço. A junção isolante 106' pode ser constituída de uma conexão de oficina, onde o pino possui um fino revestimento de cerâmica, de cerca de 0,010 a 0,020 pol. de espessura. A conexão de pino revestida com cerâmica é atarraxada numa conexão tipo fêmea, e a conexão de oficina montada é injetada com epóxi. Essa conexão de oficina é permanente e

não rompida, após a ferramenta ser fabricada. Este conjunto pode propiciar um alto grau de isolamento elétrico entre o comando de perfuração 16' e a seção de comando 15 F'.

Uma camada de isolante 103 - 1' cobre o exterior da  
5 junção isolante 106', enquanto que outra camada de isolante 112 cobre o interior. Essas camadas externa e interna de isolante podem ser feitas, por exemplo, de fibra de vidro e/ou de borracha. Sua finalidade é aumentar a resistência elétrica entre o eletrodo inferior E1 (comando de  
10 perfuração 16' e broca de perfuração 17') e o comando de perfuração 15 F, que seria, de outro modo, reduzida, quando a lama de perfuração condutora estivesse presente. A camada externa de isolante 103 - 1' também fornece isolamento elétrico em torno do eletrodo E2 102 - 1', para elevar a  
15 intensidade do sinal. Os eletrodos 102 - 1' (E2), 102 - 2' (E3) e 102 - 3' (E4) podem ser anéis metálicos embutidos respectivamente nas camadas isolantes 103 - 1', 103 - 2', e 103 - 3'. Cada um desses três eletrodos é conectado aos componentes eletrônicos de medição, por cabos e anteparas  
20 de pressão (não mostrados). Essas camadas isolantes externas e eletrodos podem ser montados de modo nivelado com o exterior do comando de perfuração ou ligeiramente recuados, para evitar danos. Cintas de desgaste com um diâmetro ligeiramente maior do que o comando de perfuração  
25 podem ser também adicionadas, para evitar danos aos eletrodos.

O eletrodo E1 (comando de perfuração 16' e broca de perfuração 17') é conectado aos componentes eletrônicos de medição, que são alojados no chassi anular 107' por uma extensão elétrica interna 110, que se encaixa em um soquete elétrico 111. O soquete elétrico 111 é diretamente fixado a uma porção superior interna do comando de perfuração 16', para proporcionar conexão elétrica ao eletrodo E1 (comando de perfuração 16' e broca de perfuração 17'). A extensão elétrica 110 consiste de uma haste de metal ou cabo que se encaixa com o soquete elétrico 111, quando a conexão de oficina for estabelecida. Uma camada isolante envolve a extensão elétrica 110, e serve para a mesma finalidade que a camada isolante interna 112.

O chassi dos componentes eletrônicos 107' contém, de preferência, a eletrônica de medição, um processador e memória, um relógio, eletrônica de comunicação, e pode conter ainda uma bateria. O chassi anular 107' é, de preferência, feito de metal e fornece uma câmara hermética a ar para a eletrônica. O chassi anular 107' pode ser retido no interior da seção 15 F' do comando de perfuração com a contraporca 113, que atarraxada na seção de comando 15 F'. Uma extensão elétrica 114 na conexão superior da ferramenta LWD fornece uma conexão elétrica para uma ferramenta MWD (não mostrada), que se comunica com a sonda de perfuração através de telemetria eletromagnética ou telemetria por pulsos de lama.

Outra modalidade de uma ferramenta LWD 100", projetada para medir o potencial de escoamento, é mostrada na fig. 34. Essa modalidade é similar, em muitos aspectos, à modalidade da fig. 33. Assim, para fins de simplicidade da descrição, algarismos de referência são compartilhados para os elementos em comum, e a descrição abaixo aborda apenas as diferenças entre elas. Na modalidade da fig. 34, o eletrodo de fundo E1 é concebido por uma camada isolante externa 103 - 4 e eletrodo 102 - 4 montado no exterior do comando de perfuração 16". O eletrodo 102 - 4 pode ser concebido como um anel metálico embutido na camada isolante 103 - 4. Semelhante aos eletrodos externos montados acima do eletrodo inferior 102 - 4, a camada isolante externa 103 - 4 e o eletrodo 102 - 4 podem ser montados de maneira nivelada com o exterior do comando de perfuração 16", ou ligeiramente recuados para evitar danos. Cintas de desgaste com um diâmetro ligeiramente maior do que o comando de perfuração 16" podem ser também adicionadas, para evitar danos aos eletrodos. A camada isolante 103 - 4 isola o eletrodo E1 102 - 4 do corpo do comando de perfuração 16". A extensão elétrica 110", o soquete elétrico 111" e a antepara 116 conectam o eletrodo 102 - 4 aos componentes eletrônicos de medição, que são alojados no chassi anular 107'.

Com relação agora às figs. 35A e 35B, um eletrodo das ferramentas aqui descritas, tal como o eletrodo E4 102

- 3' das figs. 33 e 34, pode ser segmentado em diversos eletrodos separados, a fim de medir variações azimutais do potencial de escoamento. As figs. 35A e 35B mostram quatro eletrodos (102 - 3A, 102 - 3B, 102 - 3C e 102 - 3D) distribuídos em torno da circunferência do comando de perfuração 15F. A vista de seção transversal da fig. 35A é perpendicular às vistas das figs. 33 e 34. A vista da fig. 35B mostra somente o isolante 103 - 3 e três dos quatro eletrodos. Os quatro eletrodos são conectados aos componentes eletrônicos por anteparas e cabos (não mostrados). Qualquer um dos quatro eletrodos (E1, E2, E3 e E4) das ferramentas aqui descritas podem ser assim configurados.

Foram aqui descritas e ilustradas diversas modalidades de aparelho e métodos para medir potenciais de escoamento e caracterizar aspectos da sua formação terrestre. Embora modalidades específicas da invenção tenham sido descritas, não existe a intenção de que a invenção seja por elas limitada, existindo a intenção que a invenção seja de escopo mais amplo possível permitido pela técnica, e que o relatório descritivo seja lido da mesma forma. Assim, embora arranjos específicos de eletrodo tenham sido divulgados, deverá ser apreciado que modificações possam ser feitas, desde que o arranjo inclua uma rede de eletrodos capazes de medir potenciais de escoamento. Assim, embora seja preferível montar os

eletrodos e sensores de pressão na superfície das seções da coluna de perfuração da composição de fundo, deverá ser reconhecido que o eletrodo e o sensor de pressão podem ser montados na coluna de perfuração, fazendo parte de um  
5 comando estabilizador ou de outro conjunto de comando. Deverá ser apreciado que outras configurações podem ser também usadas. Se o poço for perfurado, usando-se perfuração com revestimento, perfuração com coluna auxiliar, ou perfuração com tubo flexível, deve ficar claro  
10 que os mesmos princípios podem ser aplicados a estes outros métodos de perfuração. Os eletrodos, isolamento, junção isolante, e outros aspectos aqui descritos podem ser implementados na seção de revestimento, seções da coluna auxiliar, ou no tubo flexível. Assim, deverá ser apreciado  
15 pelas pessoas versadas na técnica que outras modificações ainda podem ser feitas na invenção apresentada, sem se afastar de seu espírito e escopo, conforme reivindicado.

- REIVINDICAÇÕES -

1. APARELHO PARA INVESTIGAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE ATRAVESSADA POR UM FURO DE POÇO, CARACTERIZADO pelo fato de compreender:

5 a) coluna de perfuração terminada por uma broca de perfuração; e

b) pluralidade de eletrodos, que são adaptados para medir sinais de voltagem do potencial de escoamento, onde pelo menos um da dita pluralidade de eletrodos é  
10 definido pela dita broca de perfuração.

2. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, CARACTERIZADO pelo fato de:

dita coluna de perfuração possuir uma porção terminal incluindo uma seção do comando de perfuração e uma  
15 junção isolante disposta entre a dita seção do comando de perfuração e da dita broca de perfuração, de modo que a dita seção do comando de perfuração seja eletricamente isolada da dita broca de perfuração.

3. Aparelho, de acordo com a reivindicação 2,  
20 CARACTERIZADO pelo fato de ainda compreender:

comando de perfuração, que conecta a dita junção isolante na dita broca de perfuração, e do dito pelo menos um eletrodo da dita pluralidade de eletrodos ser um corpo metálico definido pela dita broca de perfuração e pelo dito  
25 comando de perfuração, coletivamente.

4. Aparelho, de acordo com a reivindicação 2,

CARACTERIZADO pelo fato de:

dita pluralidade de eletrodos ainda compreender um eletrodo, que é montado sobre a dita junção isolante.

5. Aparelho, de acordo com a reivindicação 2,

5 CARACTERIZADO pelo fato de:

dita pluralidade de eletrodos ainda compreender um eletrodo, que é montado sobre a dita seção do comando de perfuração, acima da junção isolante.

6. Aparelho, de acordo com a reivindicação 2,

10 CARACTERIZADO pelo fato de:

dita pluralidade de eletrodos compreender um eletrodo de referência, formado pela dita seção do comando de perfuração.

7. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1,

15 CARACTERIZADO pelo fato de ainda compreender:

pelo menos um dentre primeiro circuito, que extrai um componente CC de um determinado sinal de voltagem do potencial de escoamento, e segundo circuito, que extrai um componente CA de um determinado sinal de voltagem do potencial de escoamento.

8. Aparelho, de acordo com a reivindicação 7,

CARACTERIZADO pelo fato de ainda compreender:

processador de dados, que extrai pelo menos um produto de resposta pertinente à operações de perfuração, utilizando pelo menos um dentre o dito componente CC e o dito componente CA.

9. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, CARACTERIZADO pelo fato de:

dito pelo menos um produto de resposta fornecer uma indicação das condições de perfuração sub-balanceadas.

5 10. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, CARACTERIZADO pelo fato de:

dito pelo menos um produto de resposta caracterizar permeabilidade da formação terrestre.

11. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, 10 CARACTERIZADO pelo fato de:

15 dito pelo menos um produto de resposta incluir um primeiro produto de resposta, que caracteriza permeabilidade radial da formação, e um segundo produto de resposta, que caracteriza permeabilidade vertical da formação.

12. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, CARACTERIZADO pelo fato de:

dito pelo menos um produto de resposta fornecer uma indicação de uma fratura aberta na formação terrestre.

20 13. Aparelho, de acordo com a reivindicação 8, CARACTERIZADO pelo fato de:

dito pelo menos um produto de resposta fornecer uma indicação de pressões anormais na formação.

25 14. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, CARACTERIZADO pelo fato de ainda compreender:

transdutor de pressão para medir pressão no fundo

do poço.

15. Aparelho, de acordo com a reivindicação 14,  
CARACTERIZADO pelo fato de ainda compreender:

5       circuito que extrai um componente em fase e um  
componente fora de fase de um determinado sinal de voltagem  
do potencial de escoamento por detecção síncrona de um  
componente CA do dado sinal do potencial de escoamento, com  
um componente CA da pressão no fundo do poço medida pelo  
dito transdutor de pressão.

10       16. Aparelho, de acordo com a reivindicação 15,  
CARACTERIZADO pelo fato de ainda compreender:

      processador de dados, que extrai pelo menos um  
produto de resposta pertinente à operações de perfuração,  
utilizando o dito componente em fase e o dito componente  
15   fora de fase.

17. Aparelho, de acordo com a reivindicação 16,  
CARACTERIZADO pelo fato de:

      dito pelo menos um produto de resposta fornecer  
uma indicação das condições de perfuração sub-balanceadas.

20       18. Aparelho, de acordo com a reivindicação 16,  
CARACTERIZADO pelo fato de:

      dito pelo menos um produto de resposta  
caracterizar permeabilidade da formação terrestre.

19. Aparelho, de acordo com a reivindicação 16,  
25   CARACTERIZADO pelo fato de:

      dito pelo menos um produto de resposta incluir um

primeiro produto de resposta, que caracteriza permeabilidade radial da formação, e um segundo produto de resposta, que caracteriza permeabilidade vertical da formação.

5           20. Aparelho, de acordo com a reivindicação 16, CARACTERIZADO pelo fato de:

          dito pelo menos um produto de resposta fornecer uma indicação de uma fratura aberta na formação terrestre.

          21. Aparelho, de acordo com a reivindicação 16,  
10 CARACTERIZADO pelo fato de:

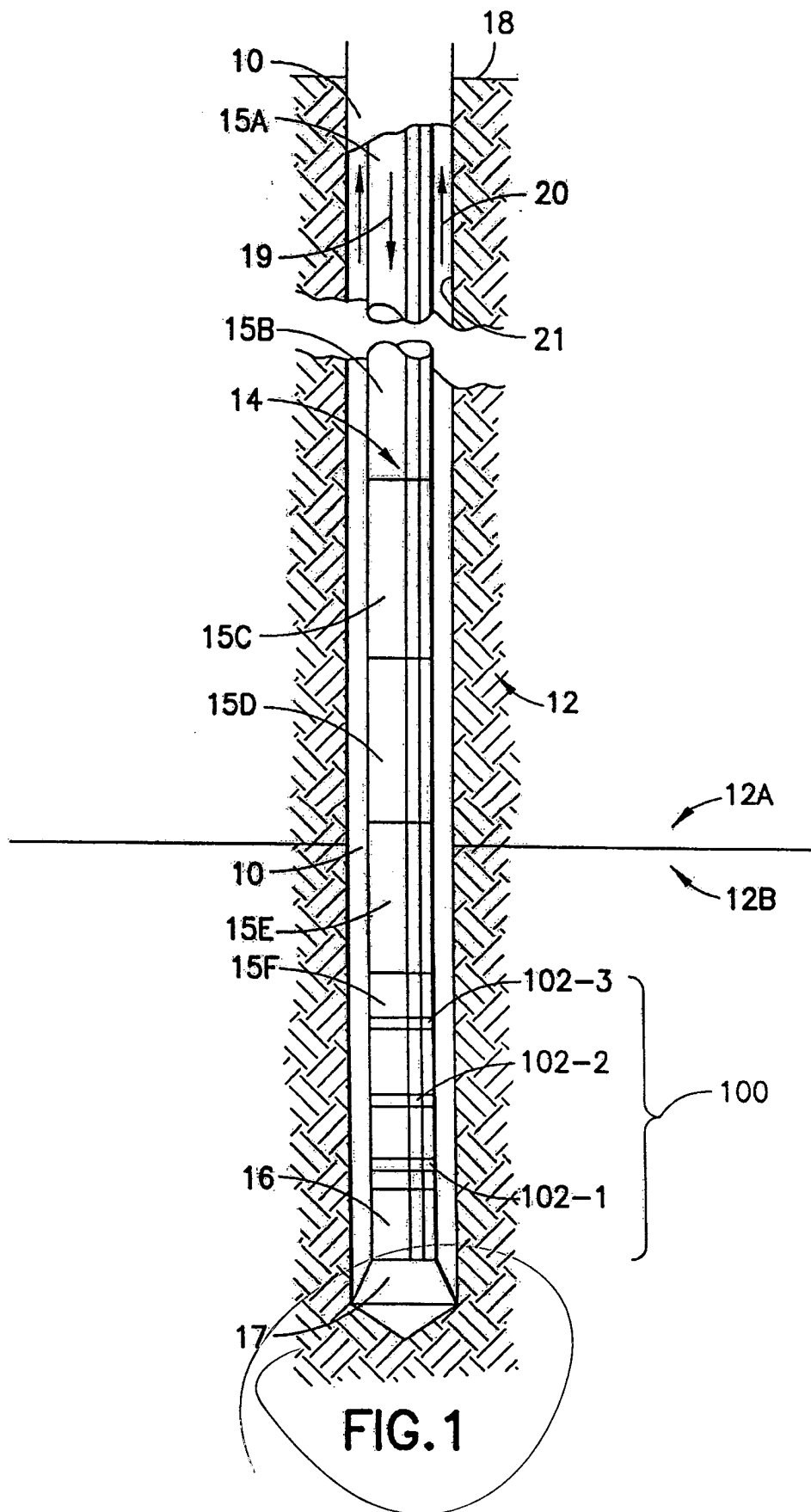
          dito pelo menos um produto de resposta fornecer uma indicação de pressões anormais na formação.

          22. Aparelho, de acordo com a reivindicação 2, CARACTERIZADO pelo fato de:

15           pelo menos um eletrodo, que é disposto, de modo operativo, abaixo da dita junção isolante, ser isolado da broca de perfuração.

          23. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, CARACTERIZADO pelo fato de:

20           pelo menos uma porção da dita pluralidade de eletrodos ser distribuída em grupos em torno da circunferência do aparelho.



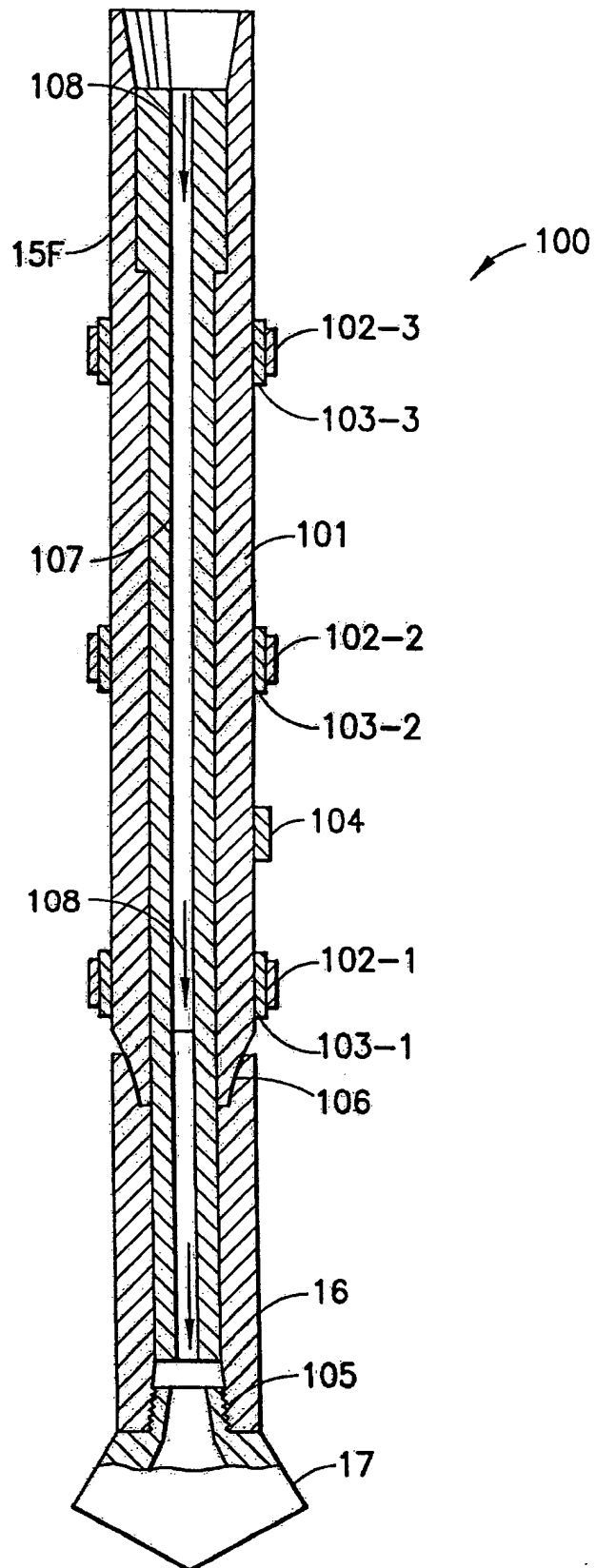


FIG.2

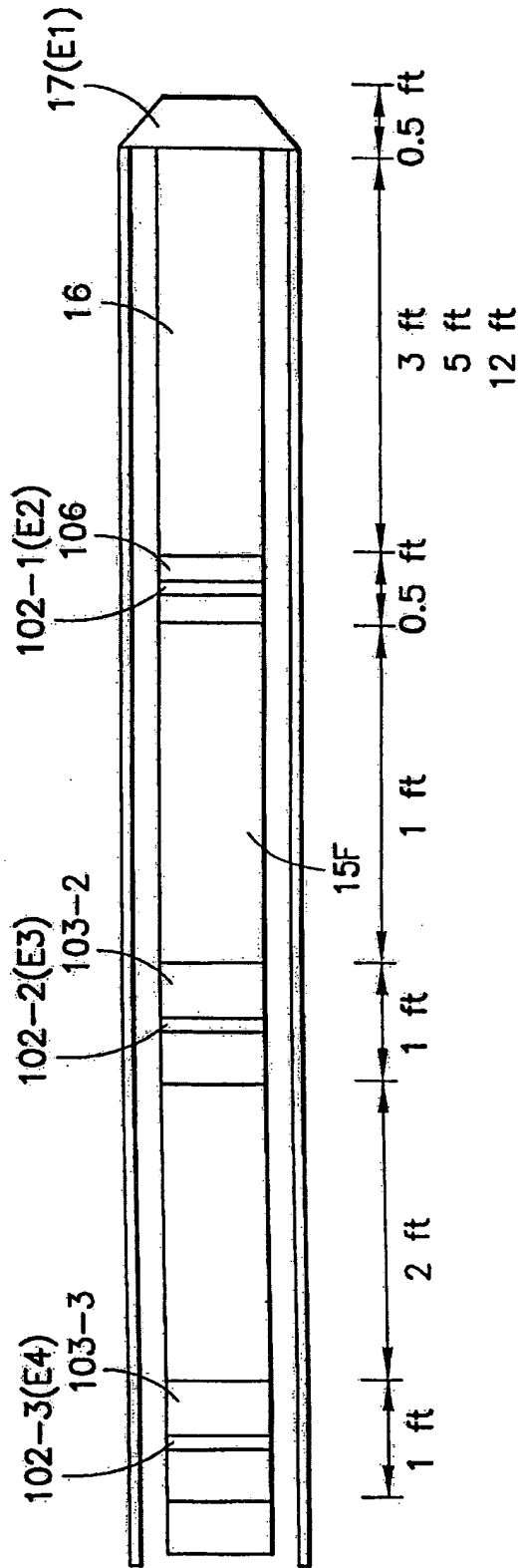


FIG.3

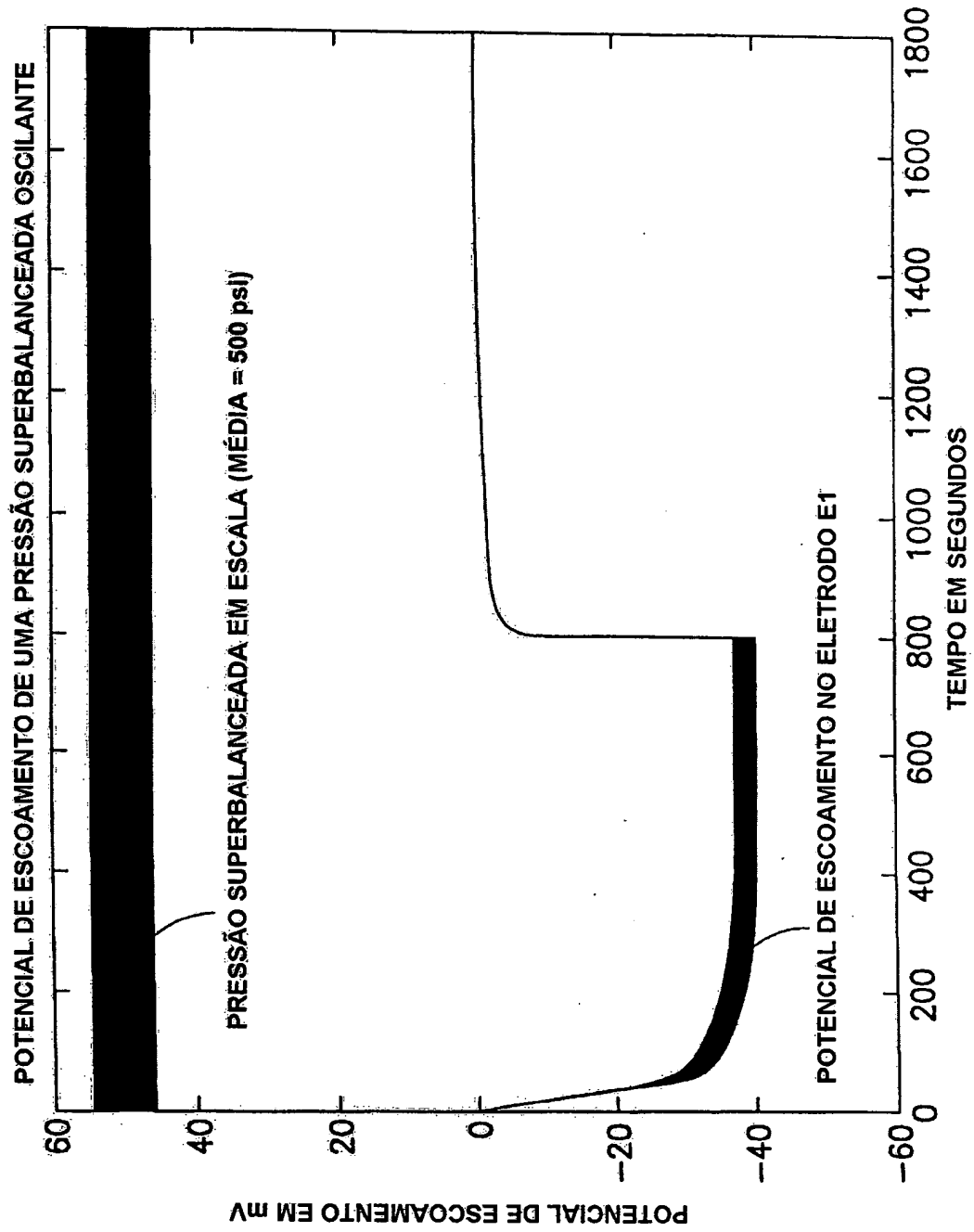


FIG.4

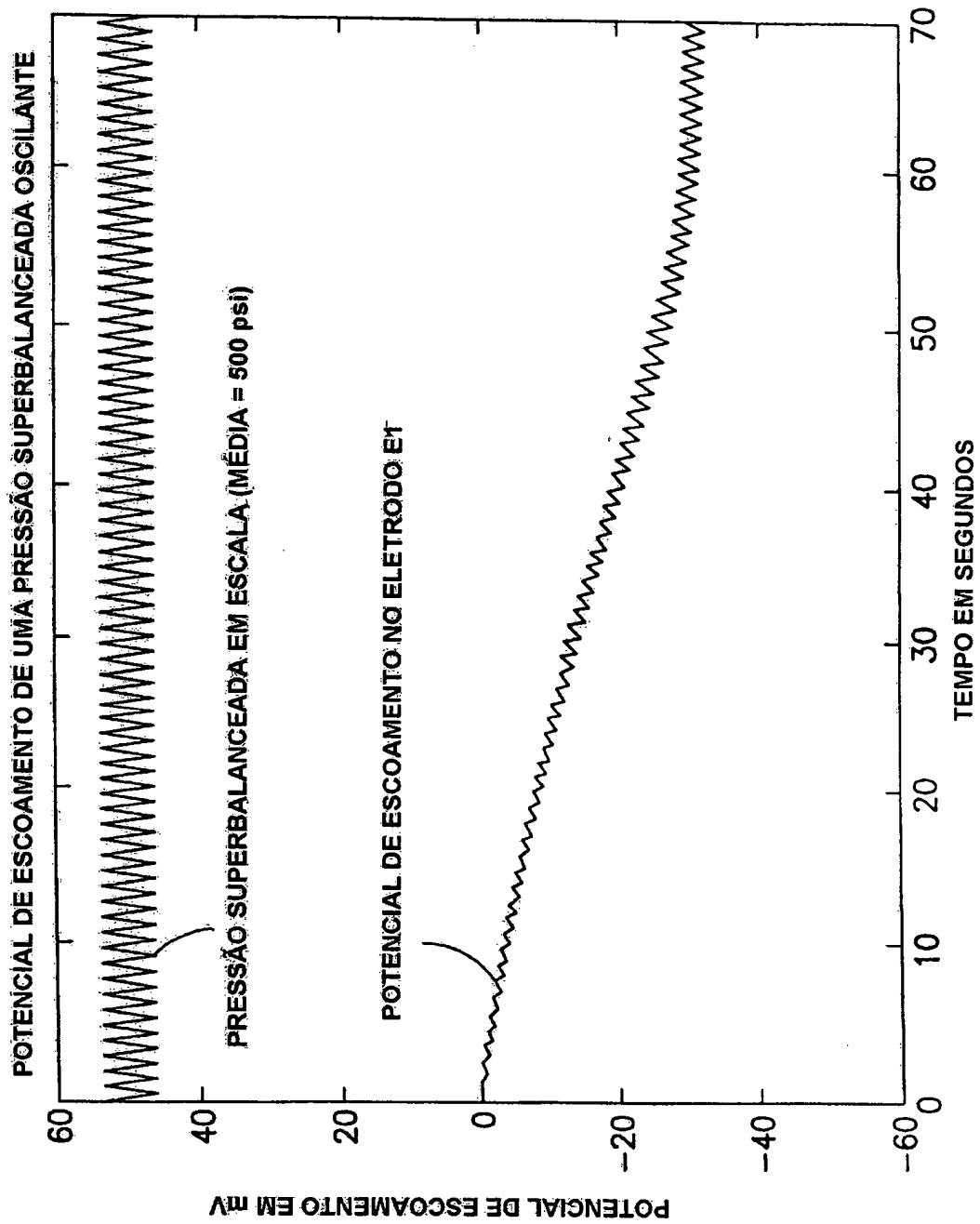


FIG.5

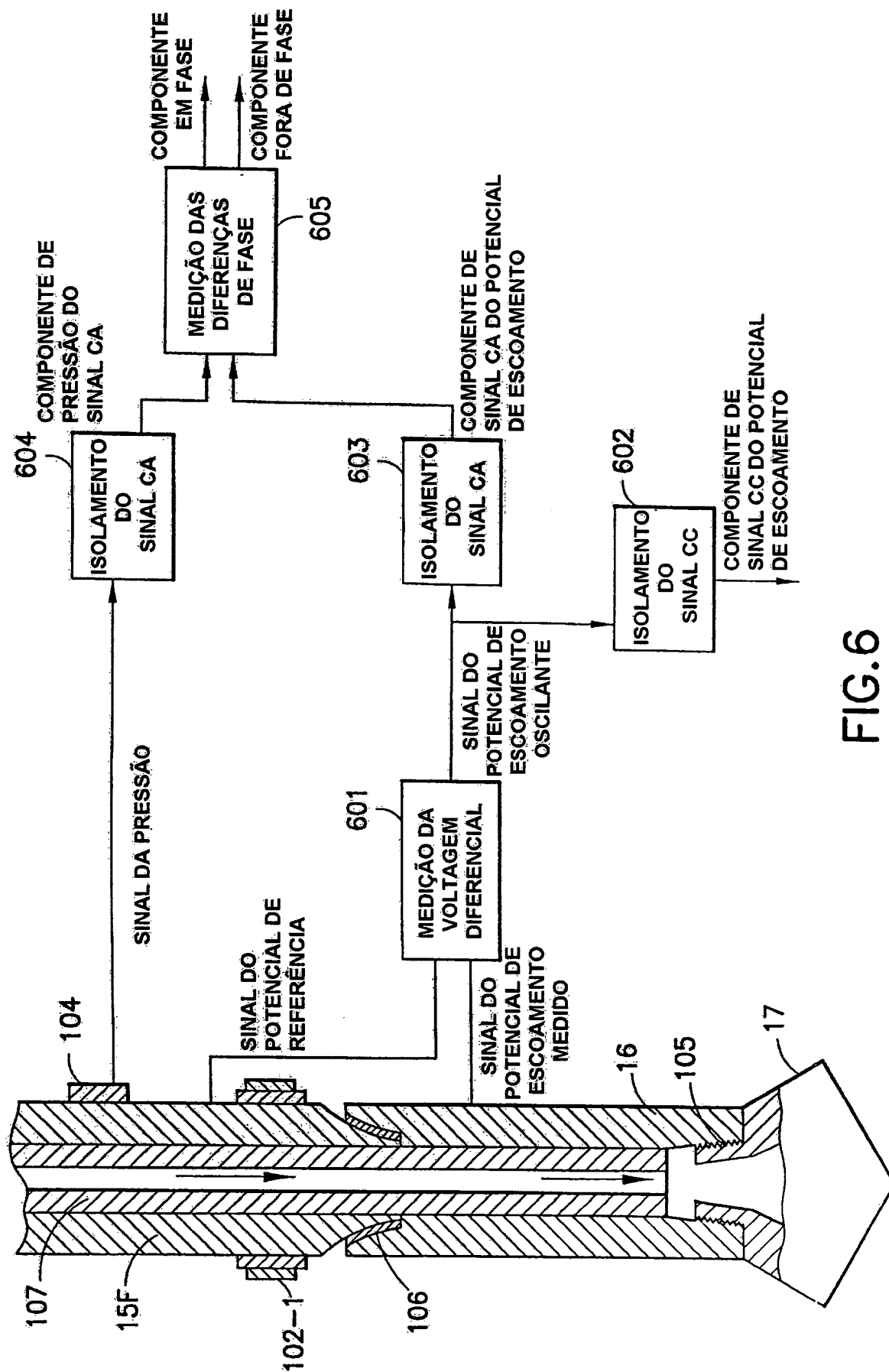


FIG.6

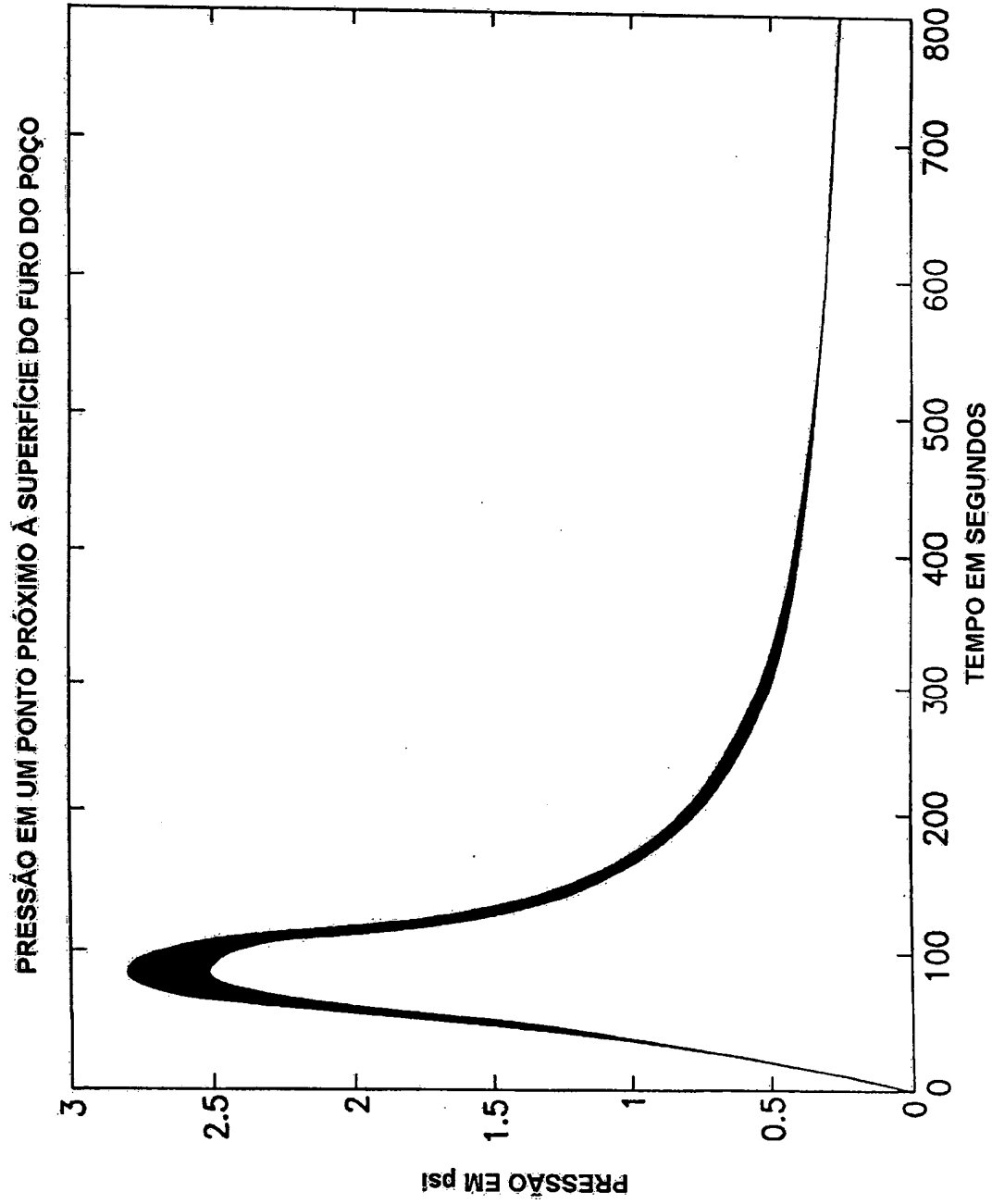


FIG.7A

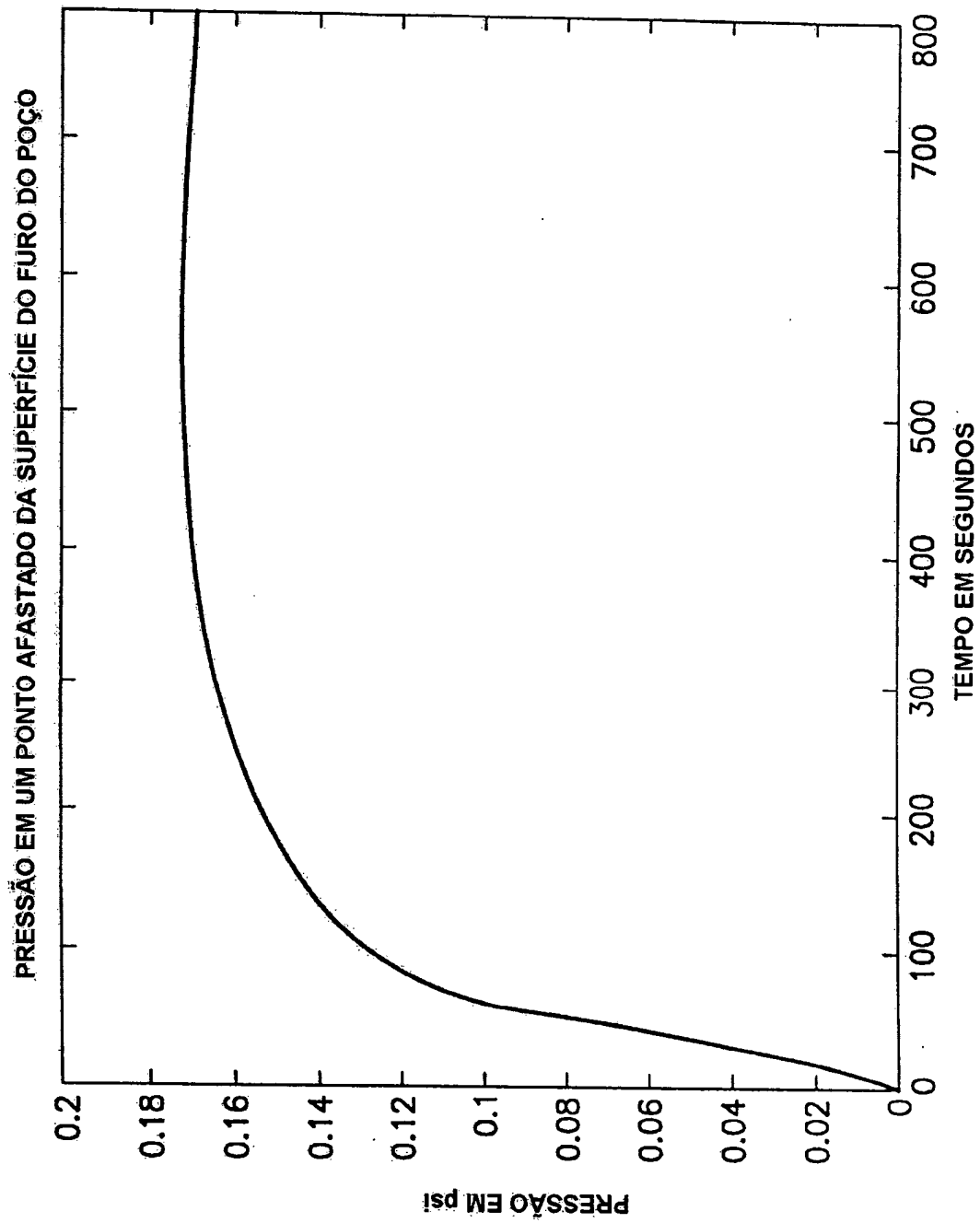


FIG.7B

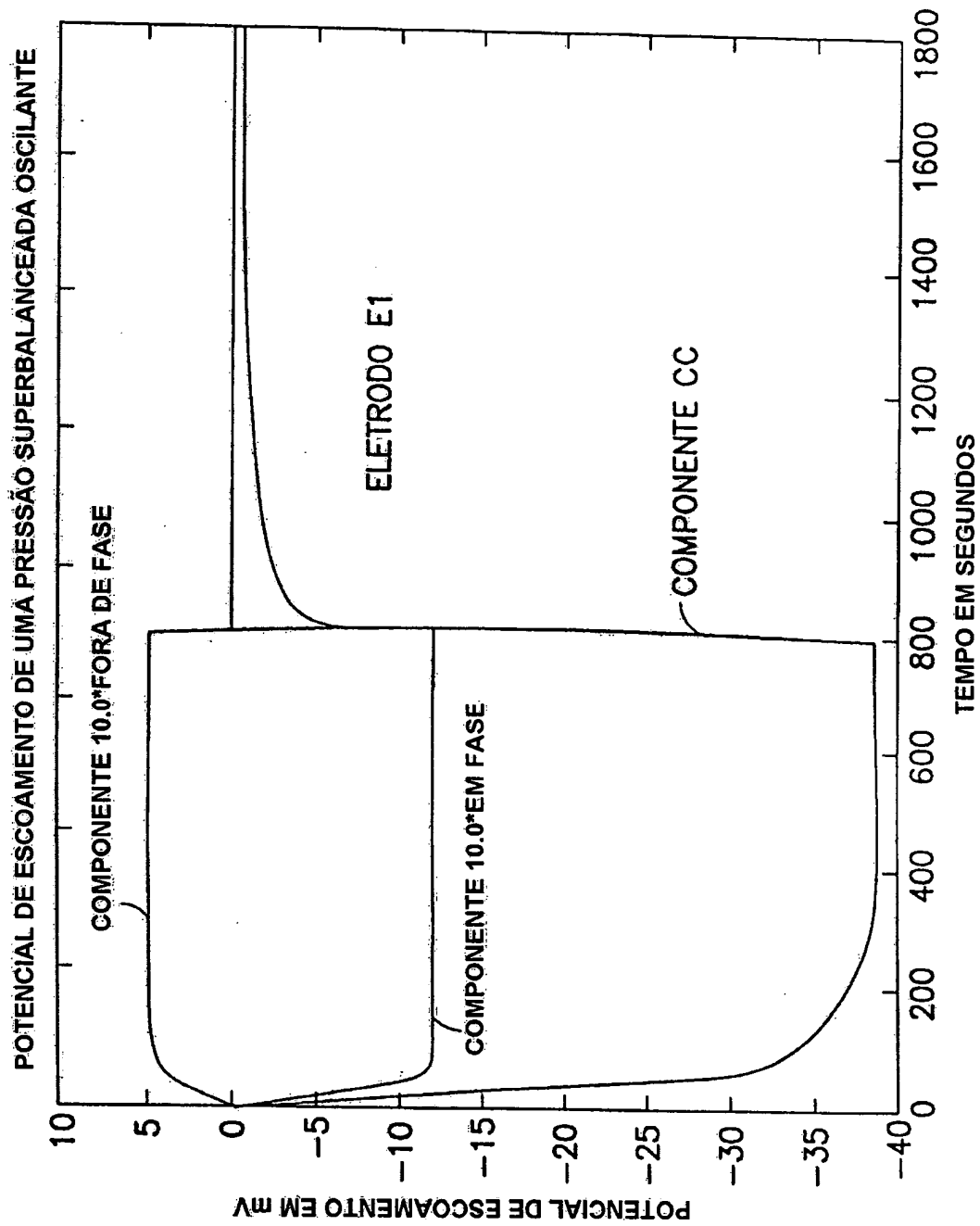


FIG.8

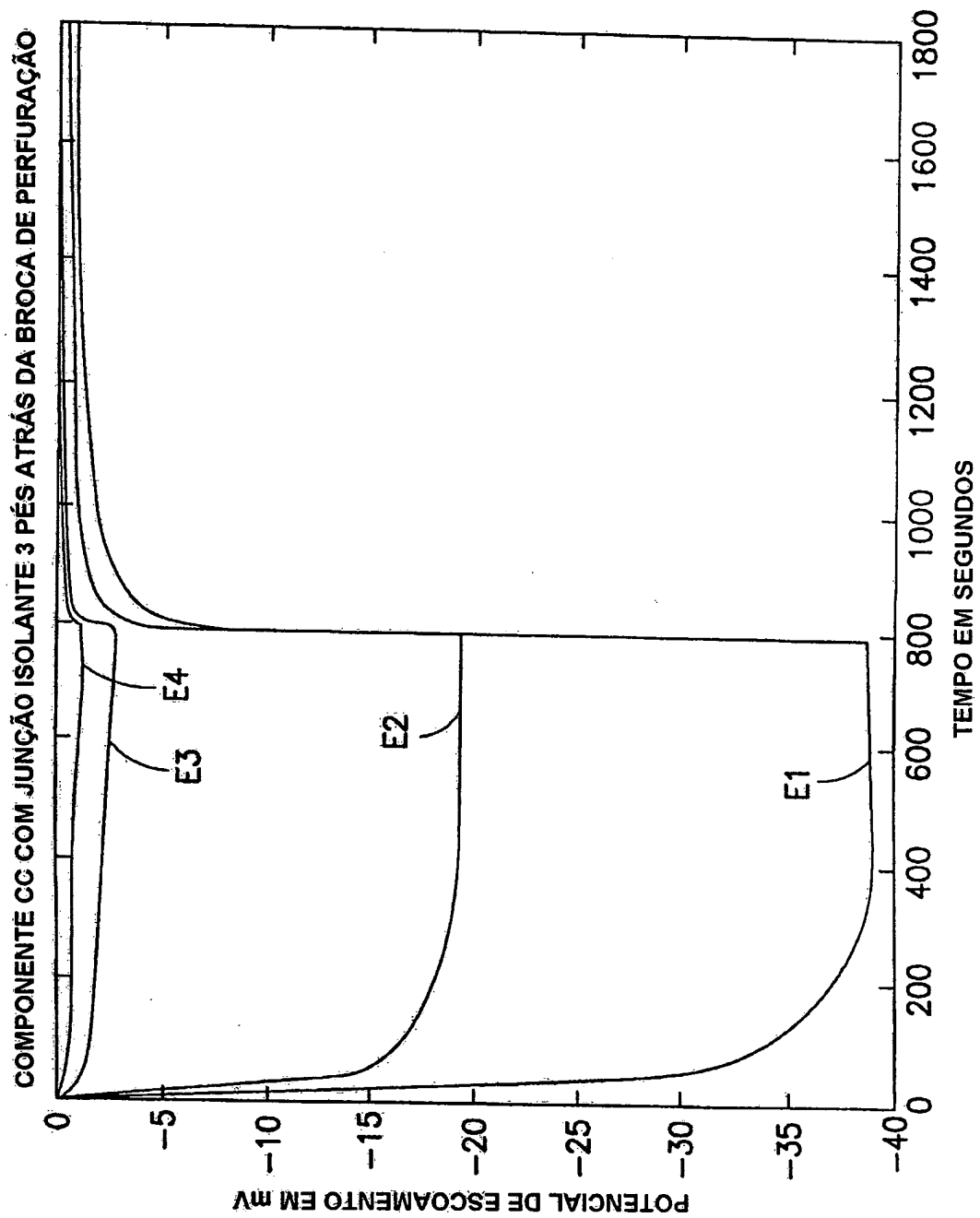


FIG.9

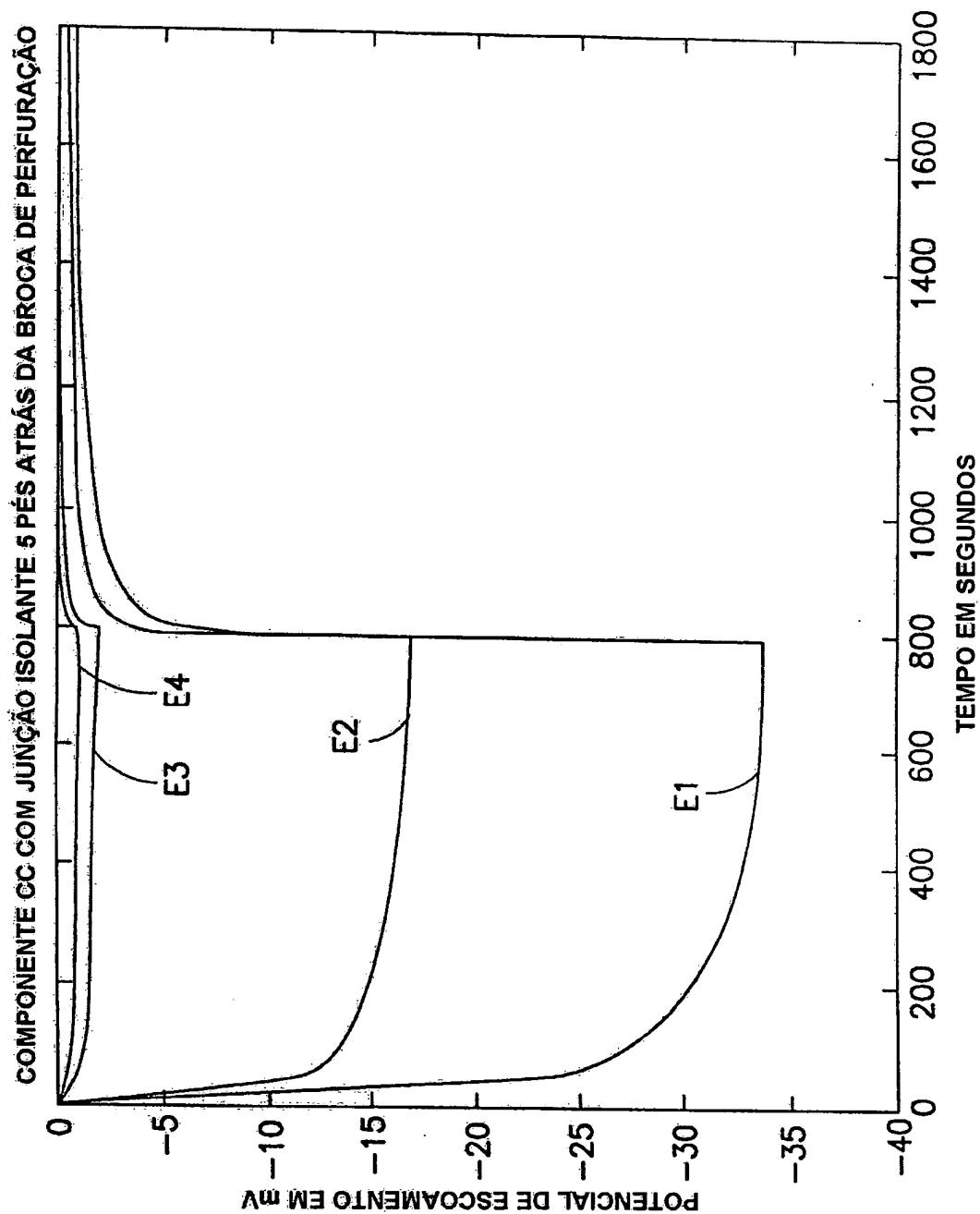


FIG.10

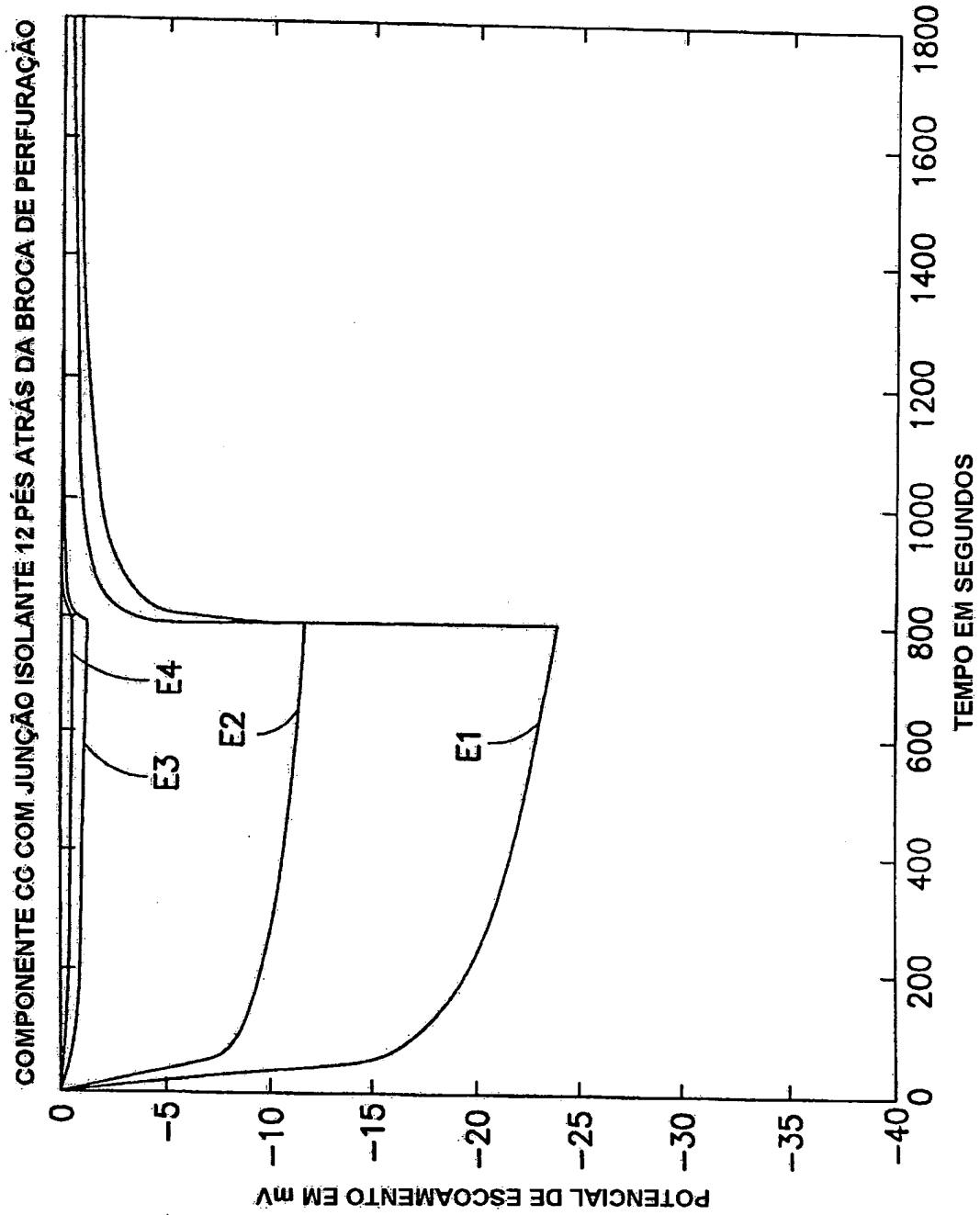


FIG.11

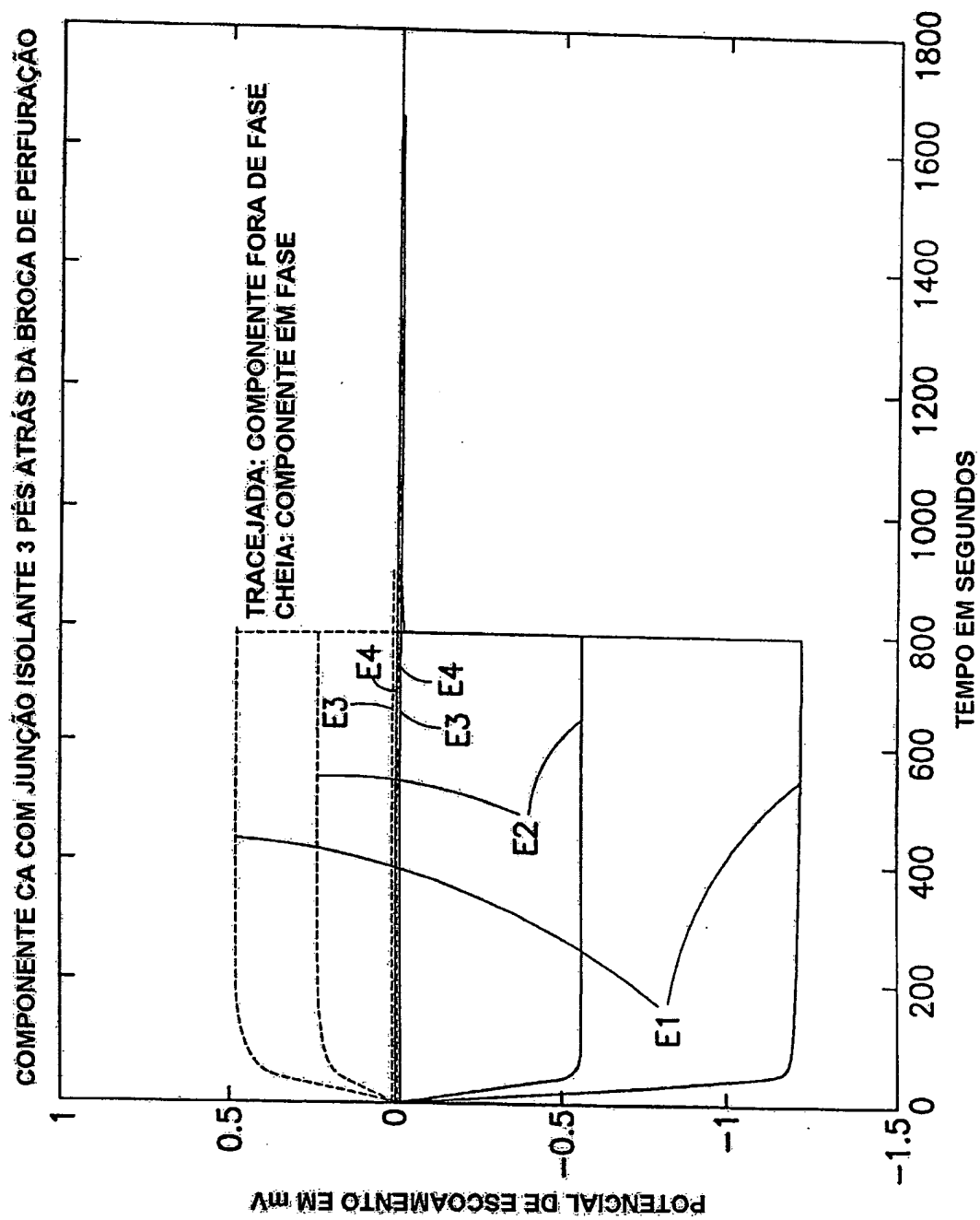


FIG.12

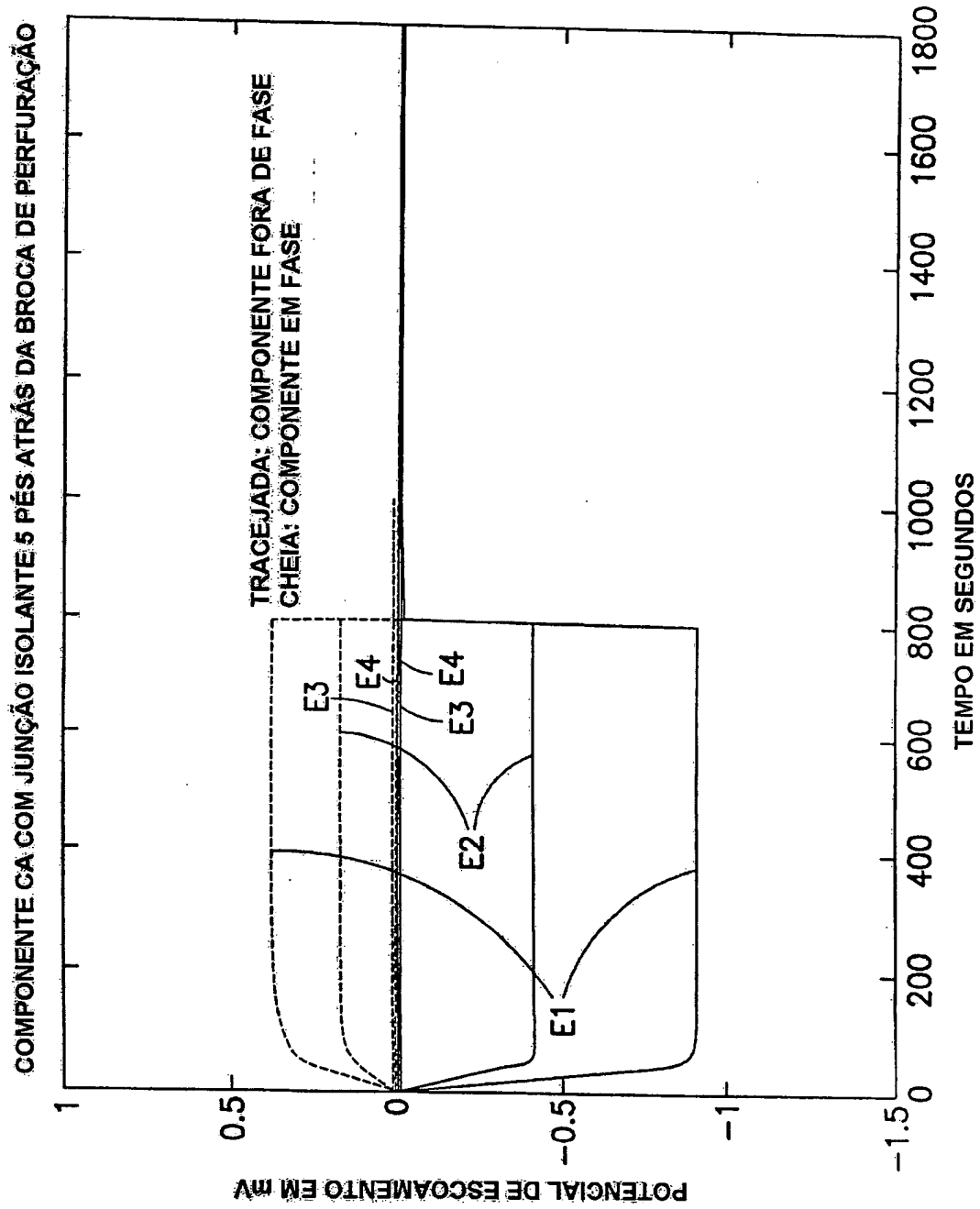


FIG.13

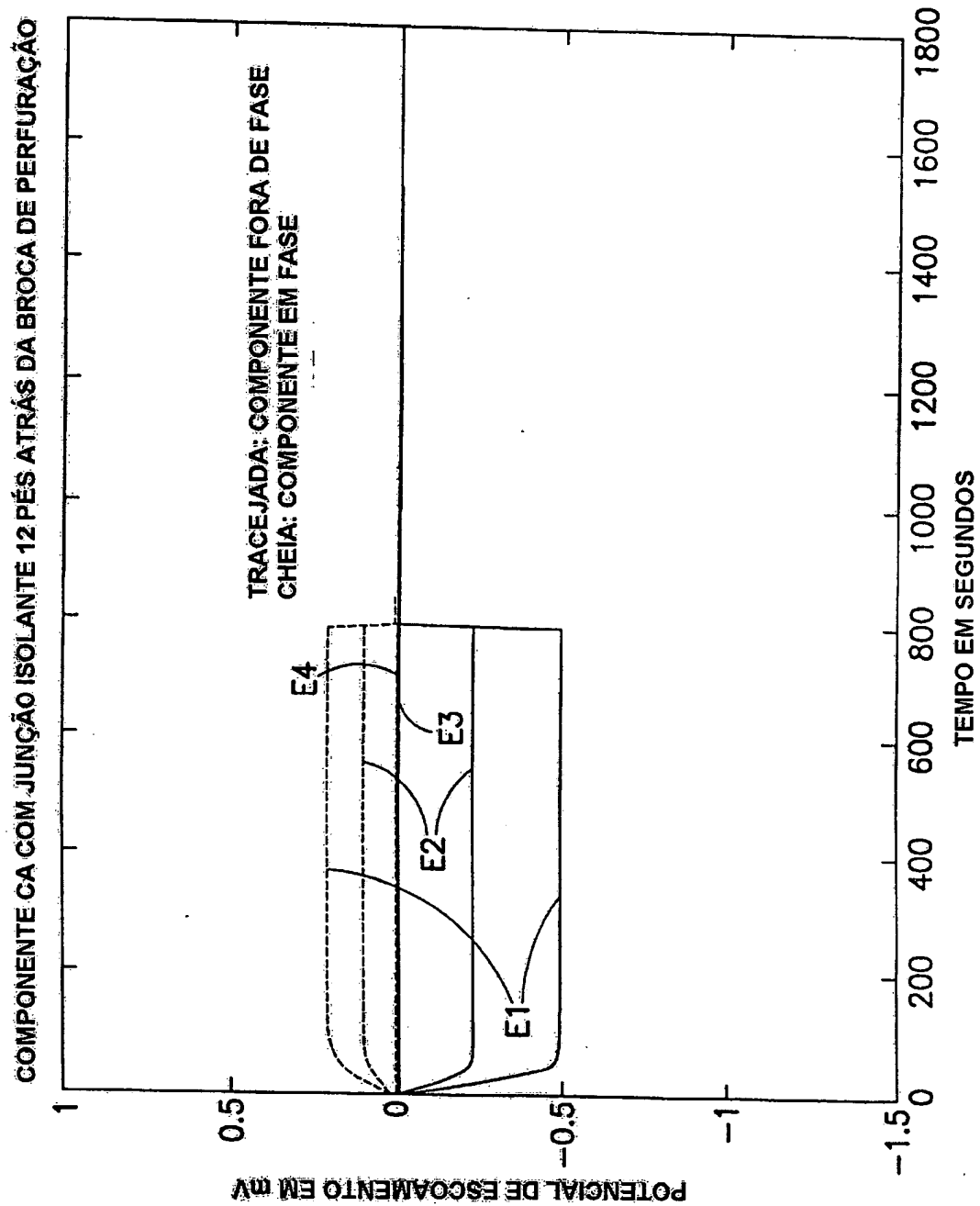


FIG.14

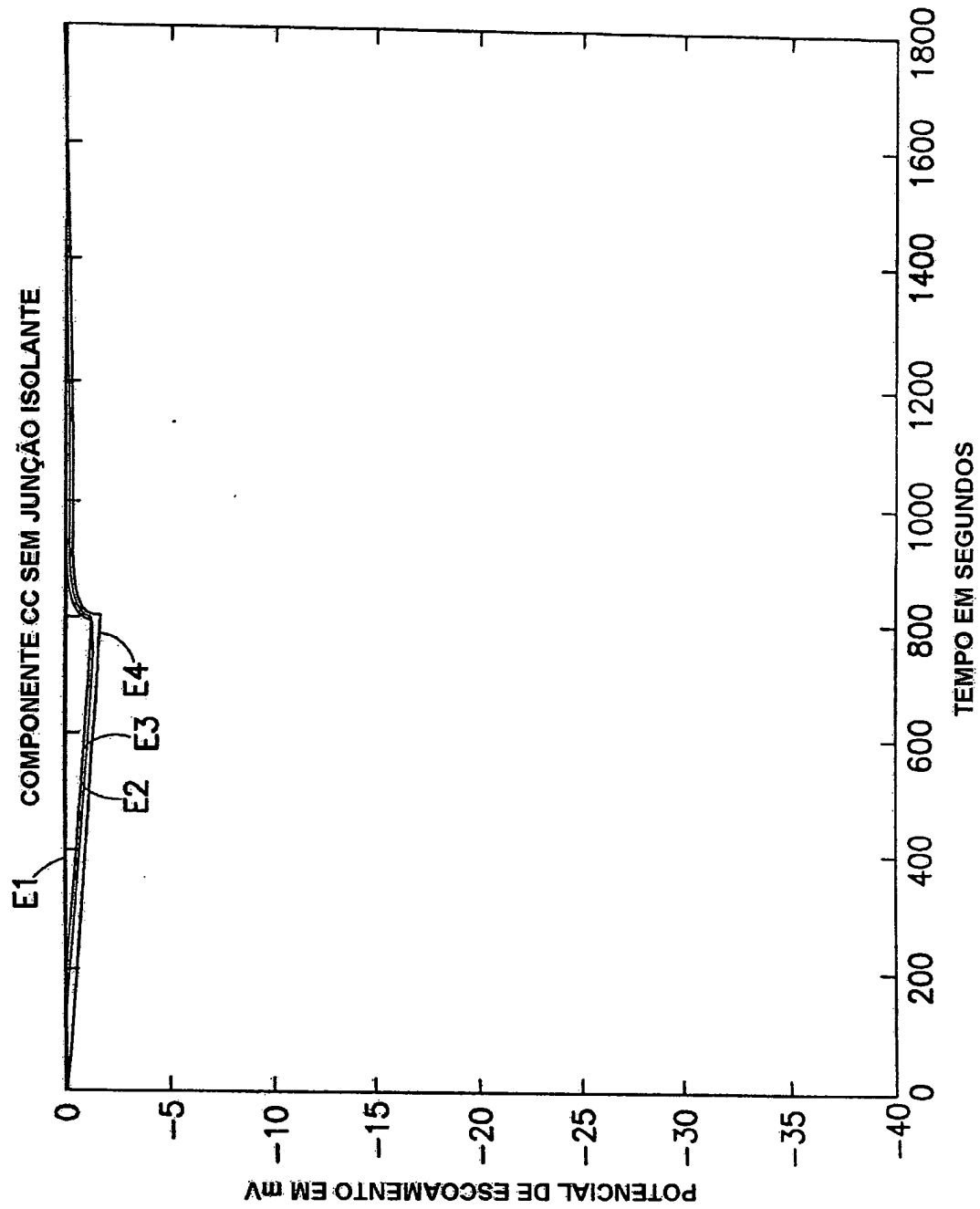


FIG.15

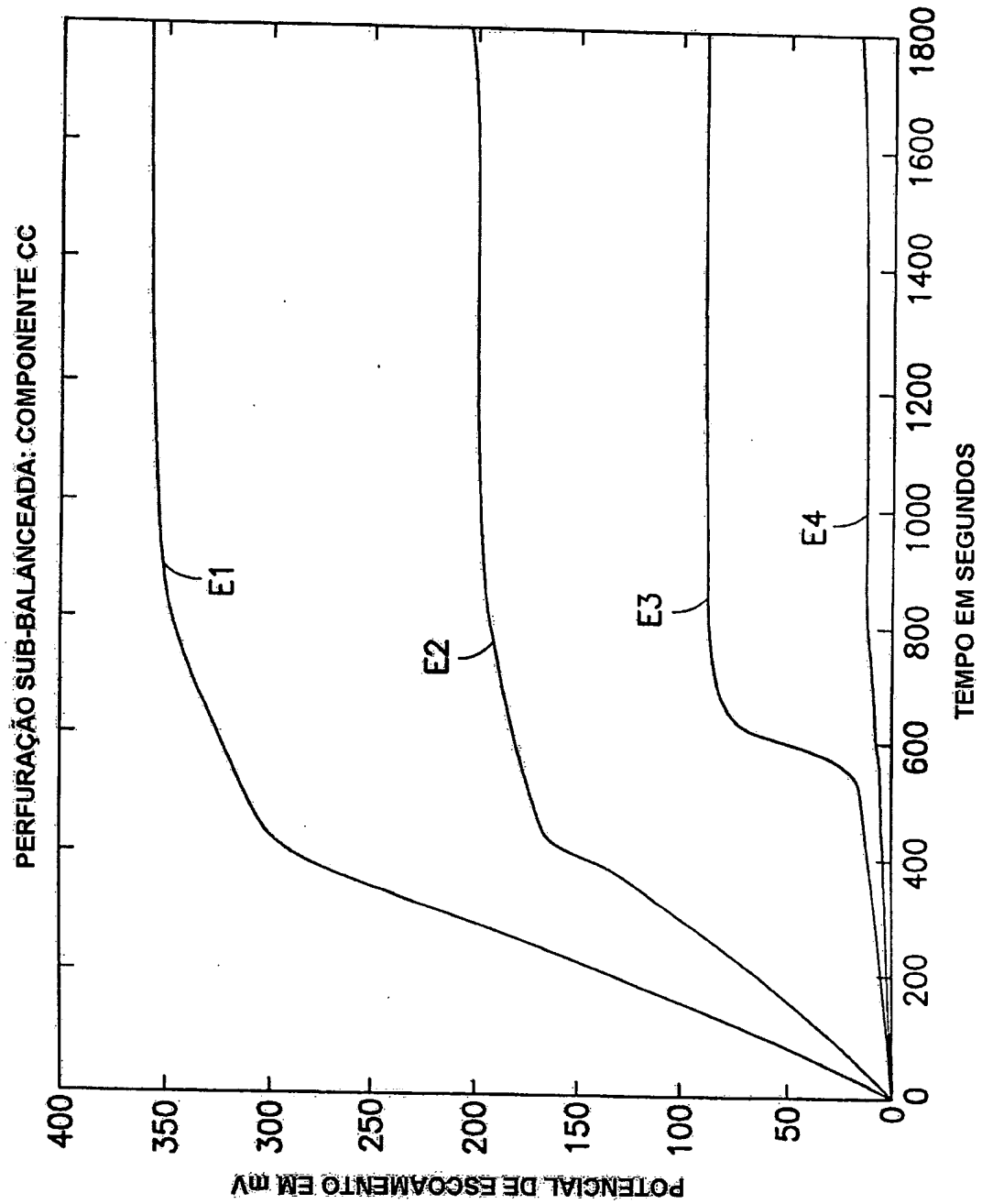


FIG.16

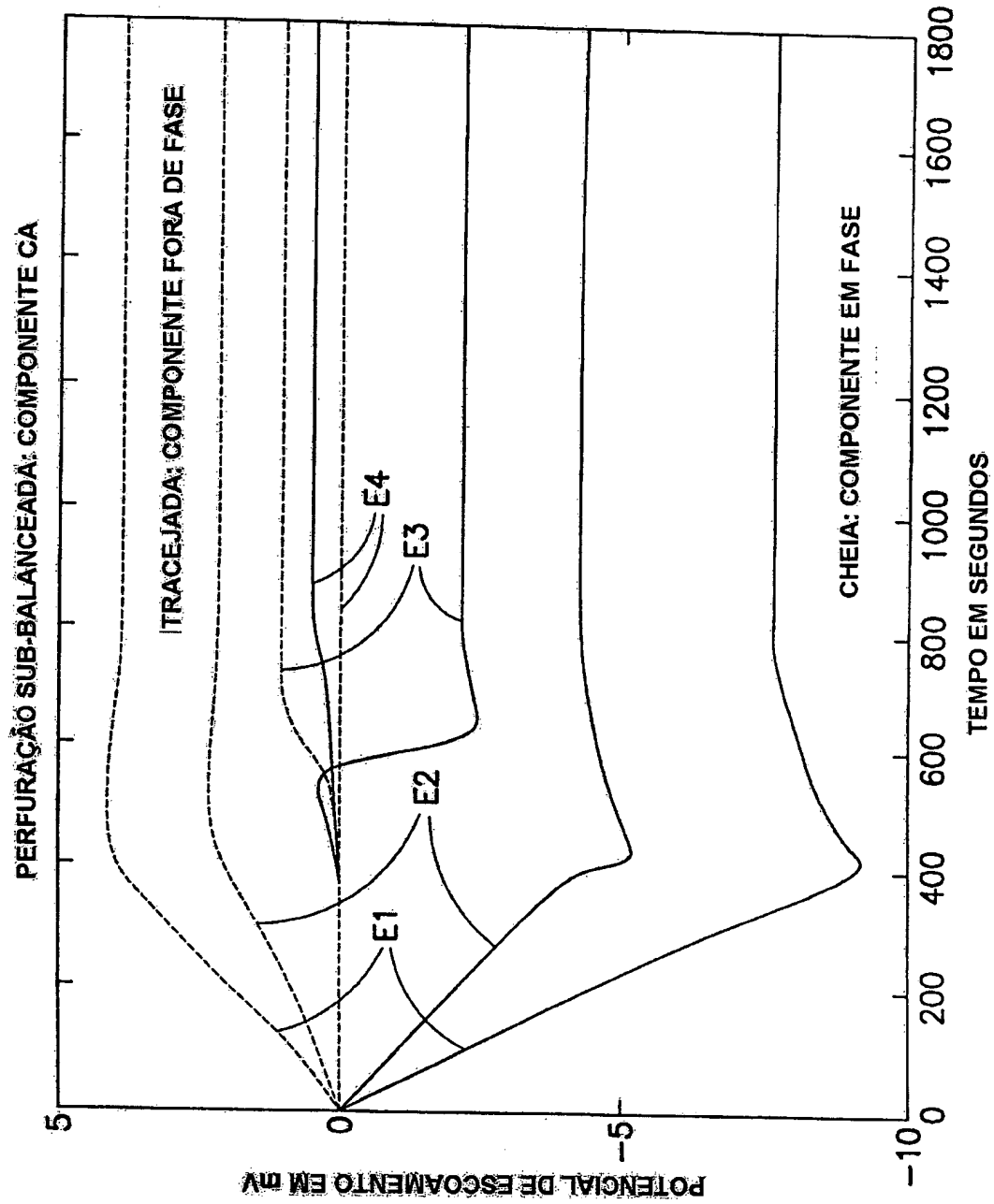


FIG.17

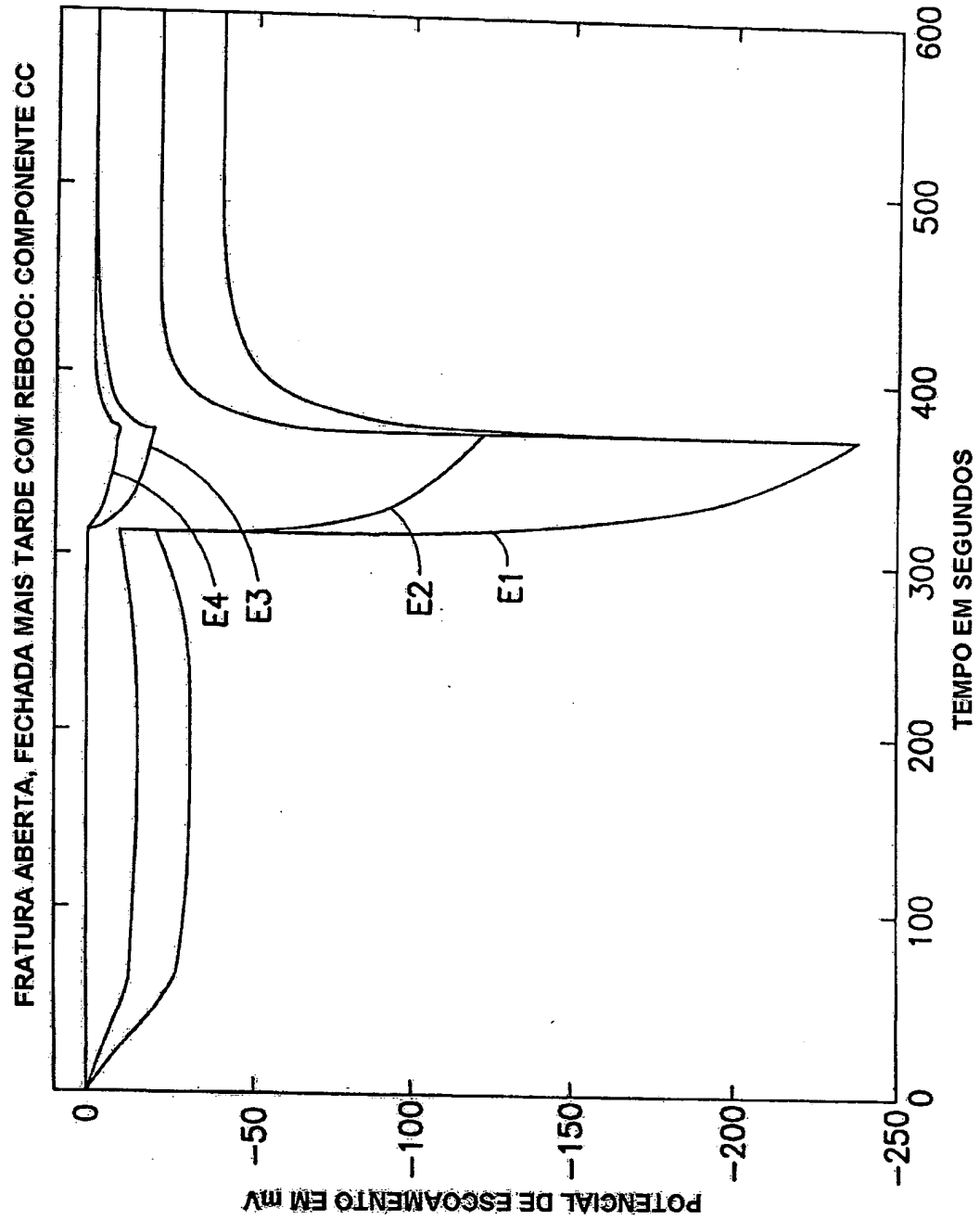


FIG.18

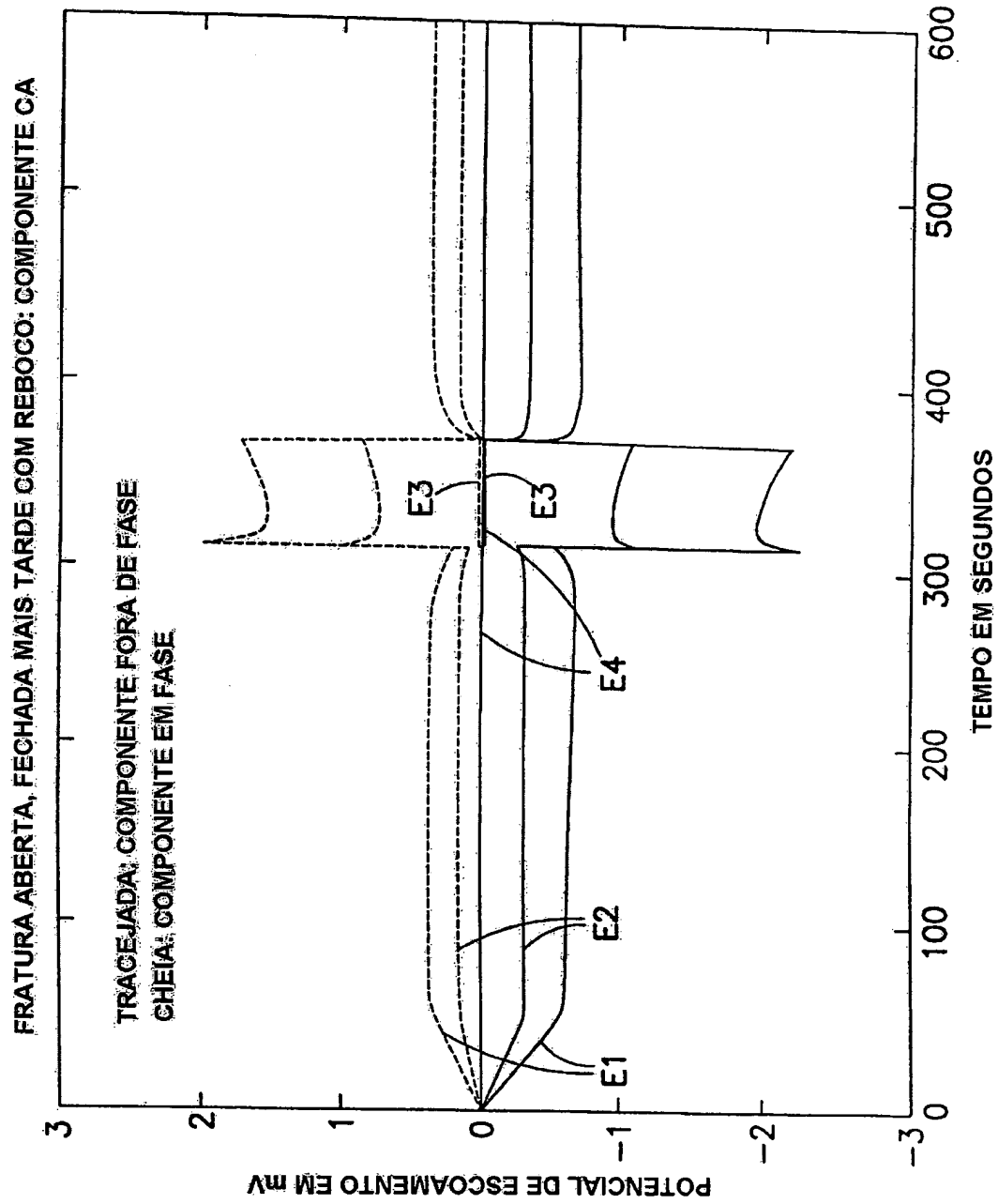


FIG.19

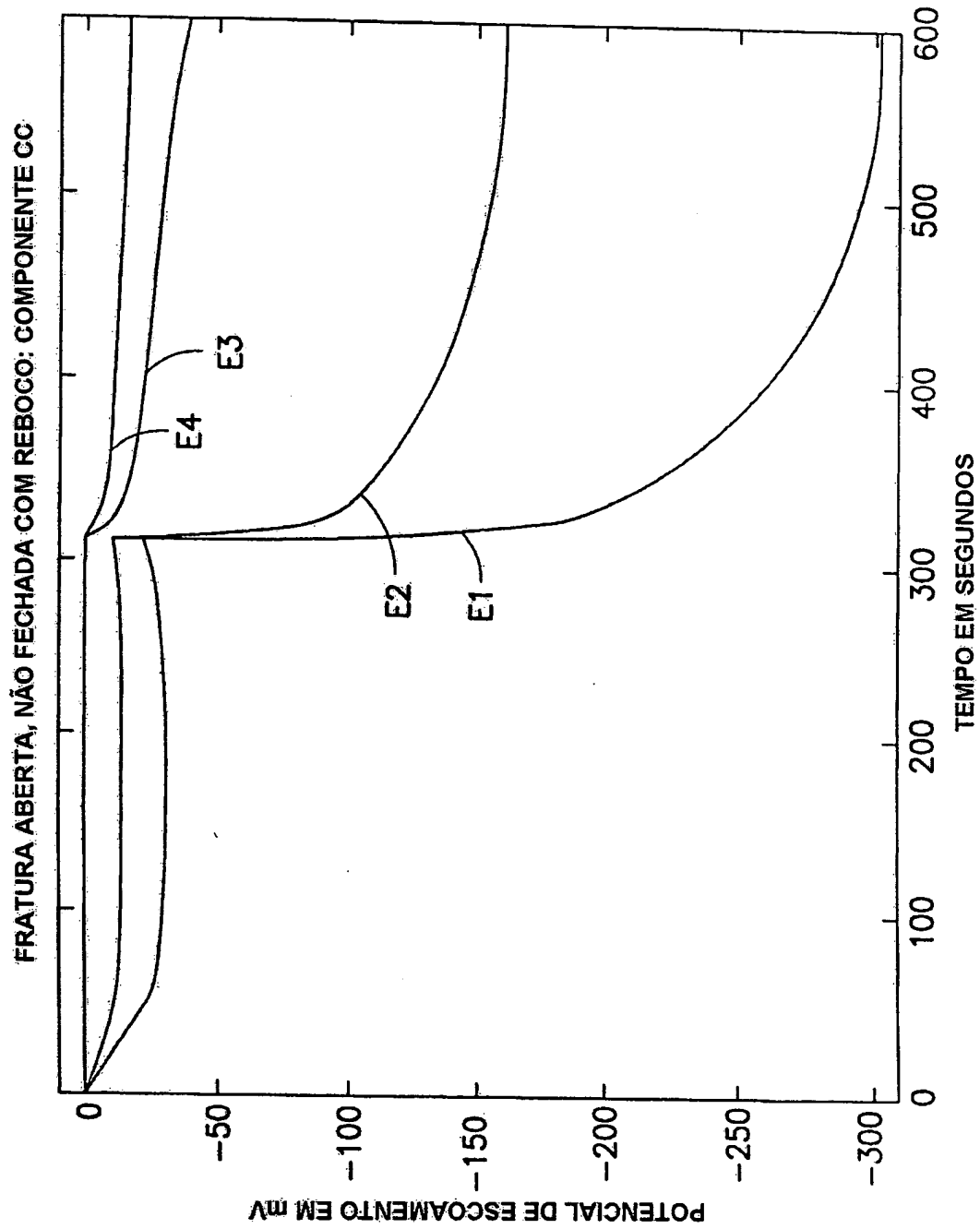


FIG.20

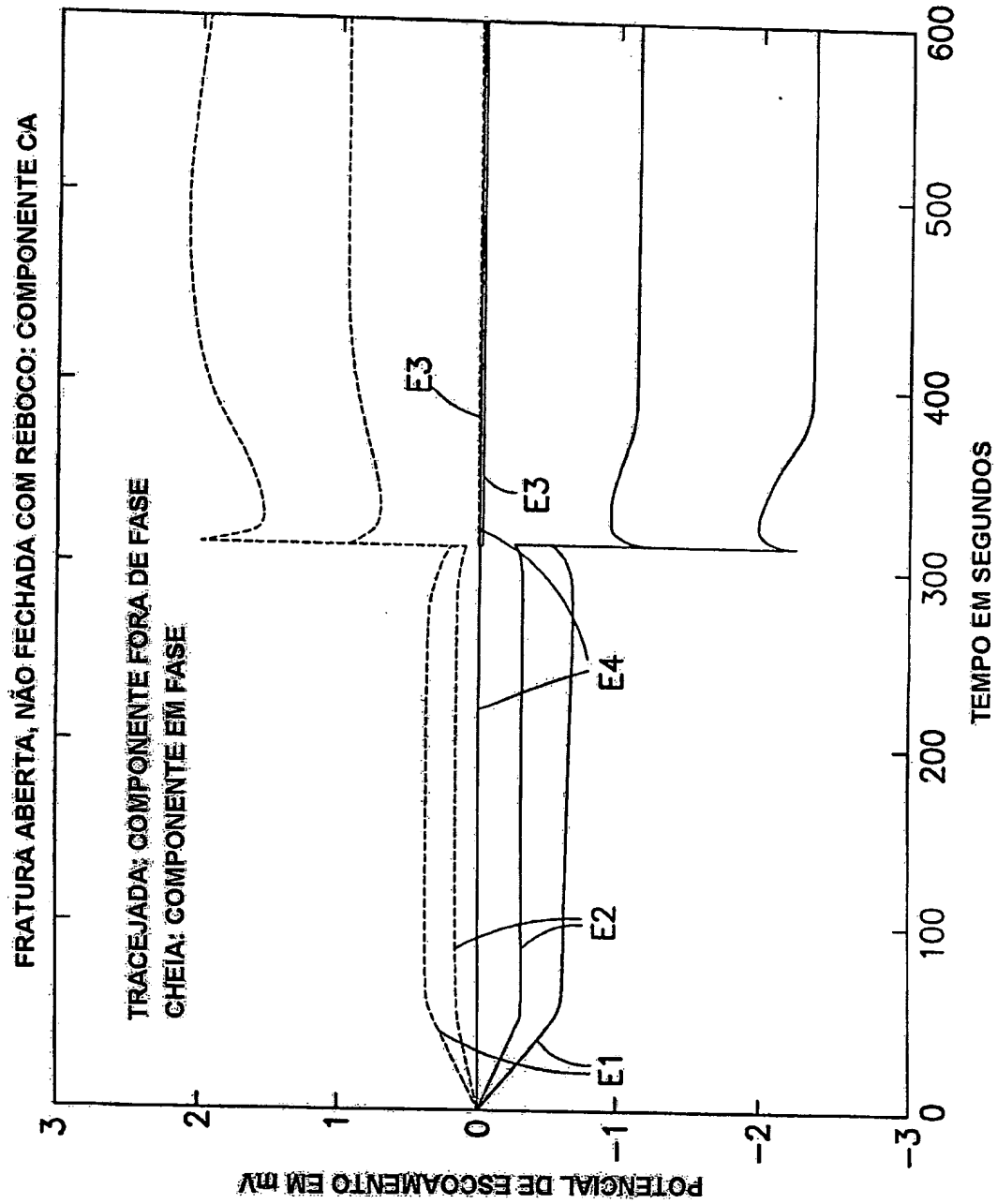


FIG.21

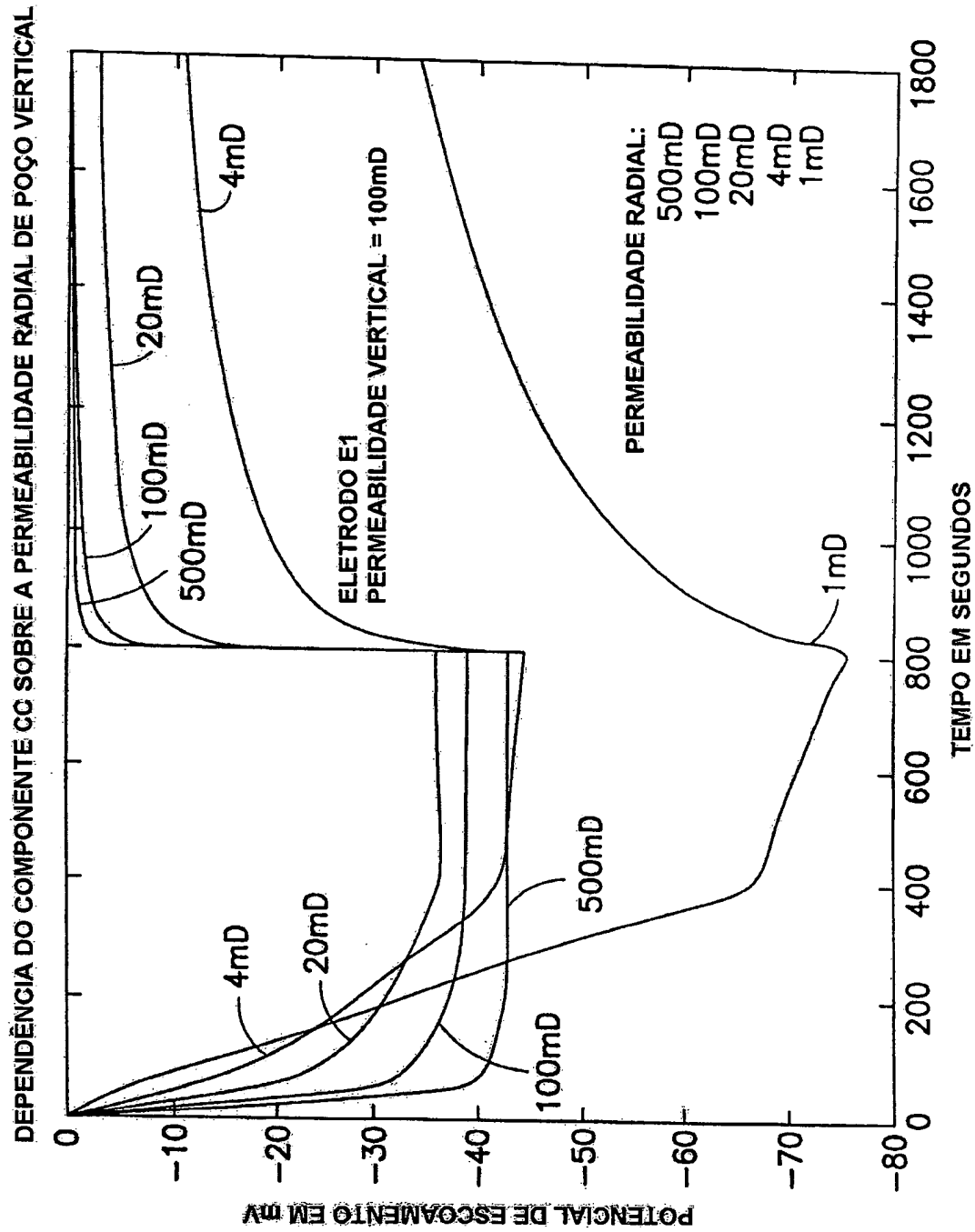


FIG.22

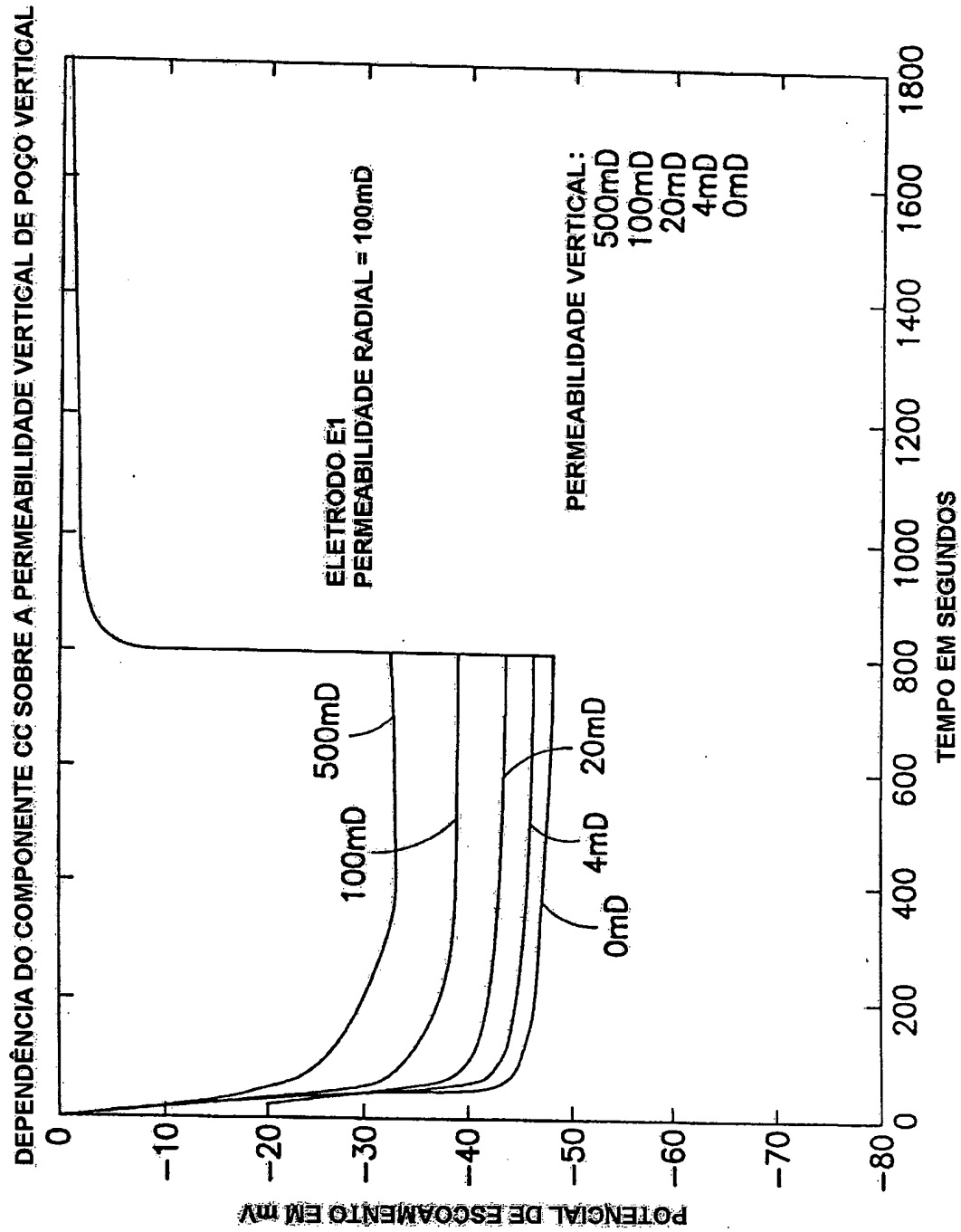


FIG.23

DEPENDÊNCIA DO COMPONENTE CC SOBRE A PERMEABILIDADE VERTICAL DE POÇO VERTICAL

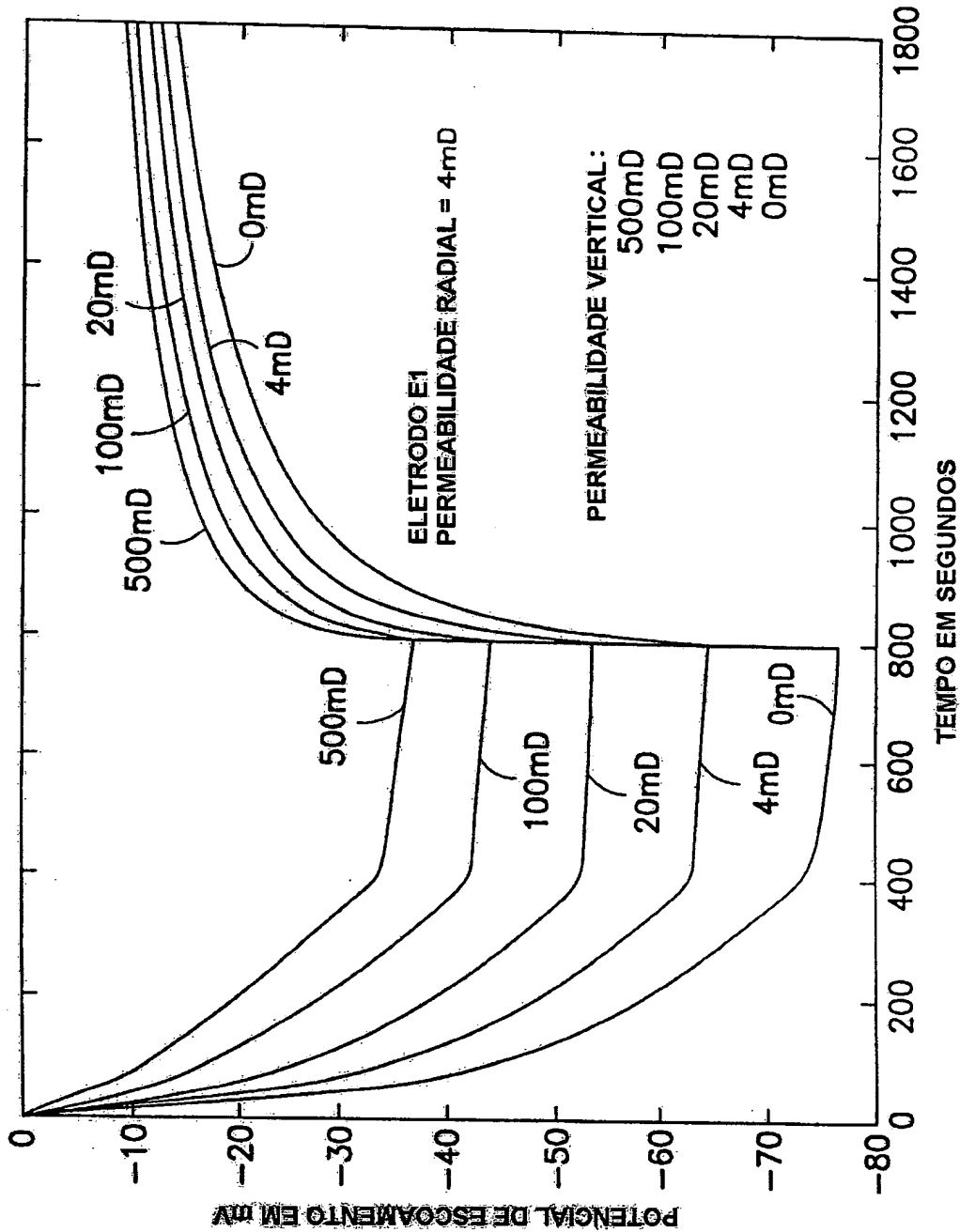


FIG.24

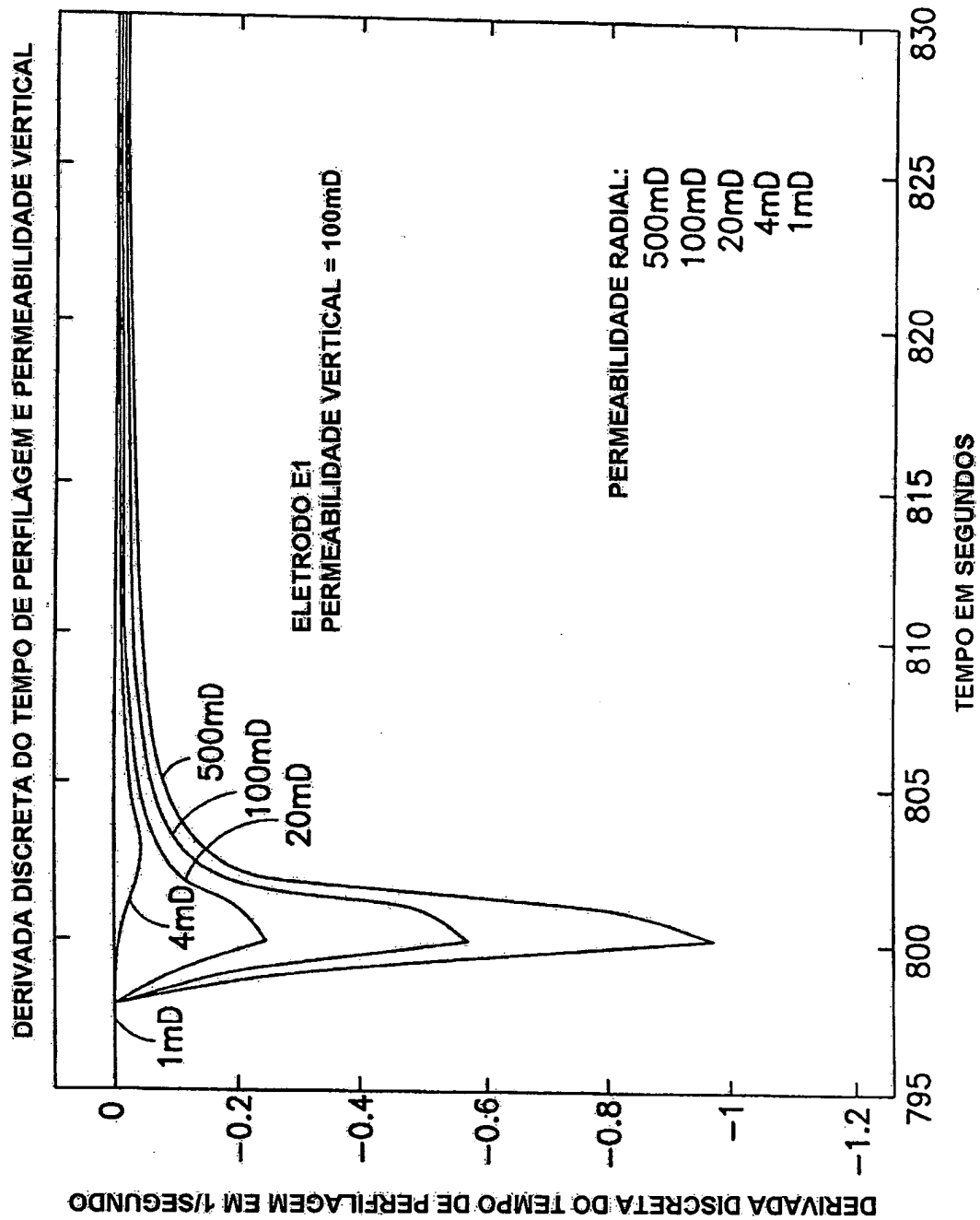


FIG.25

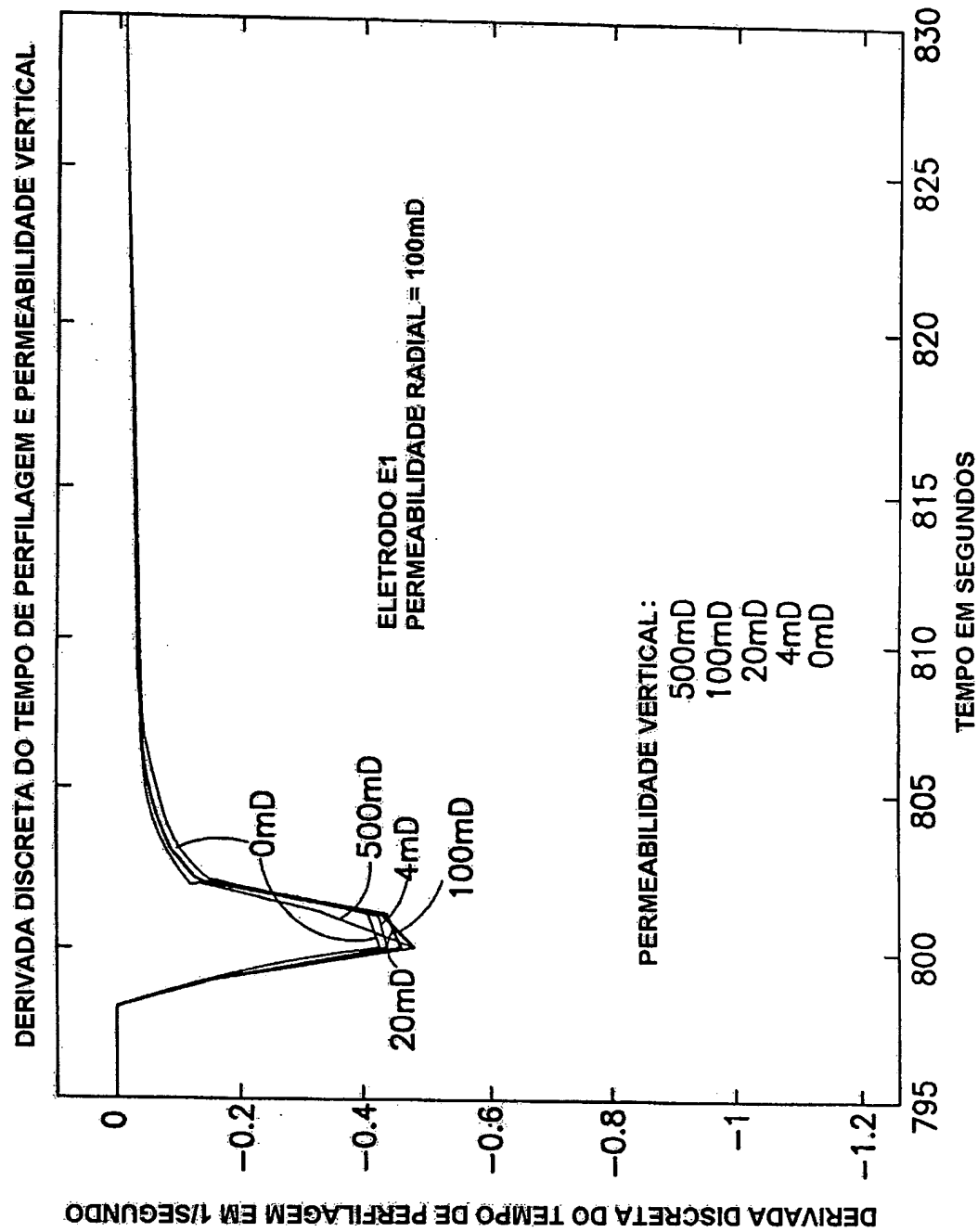


FIG.26

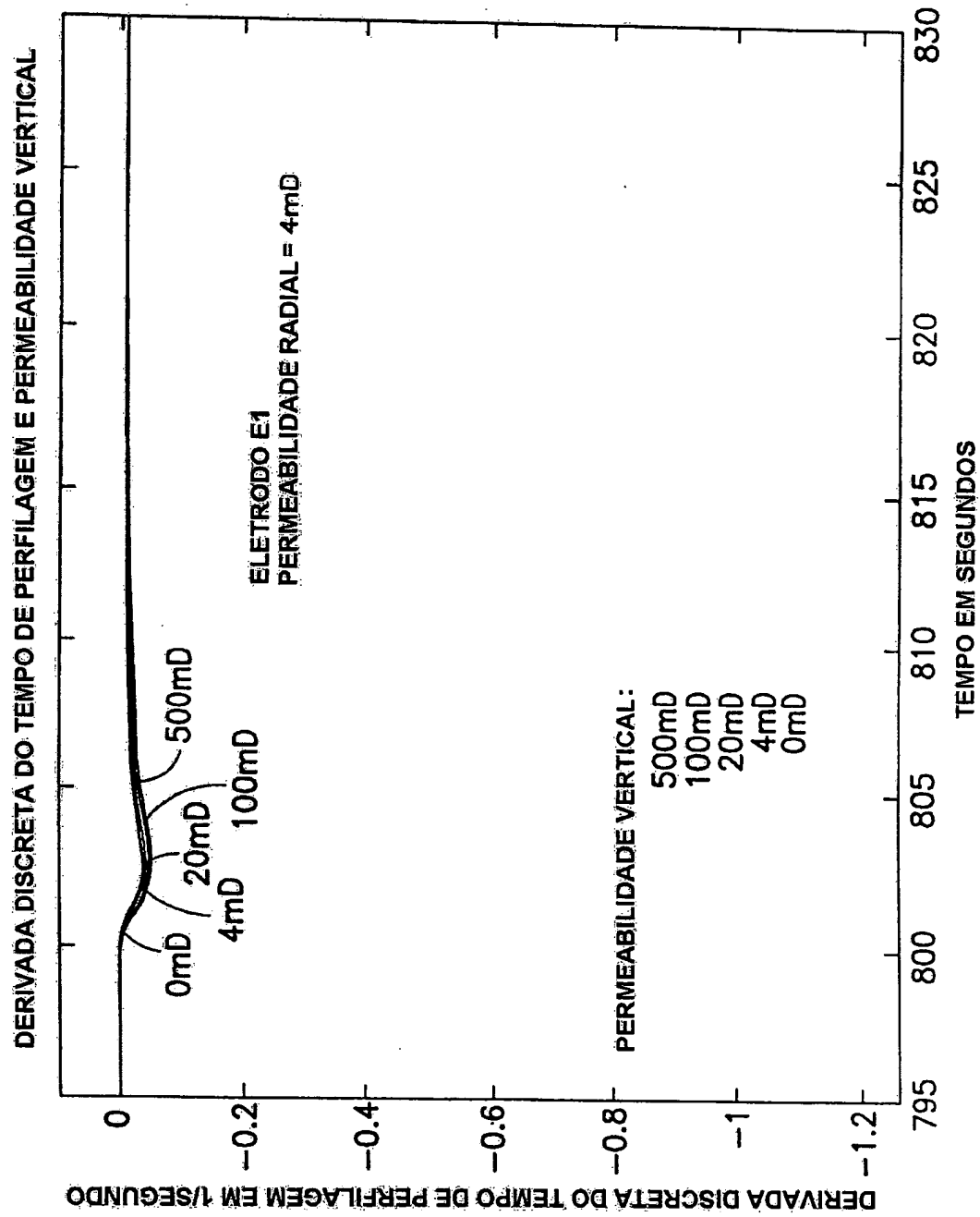


FIG.27

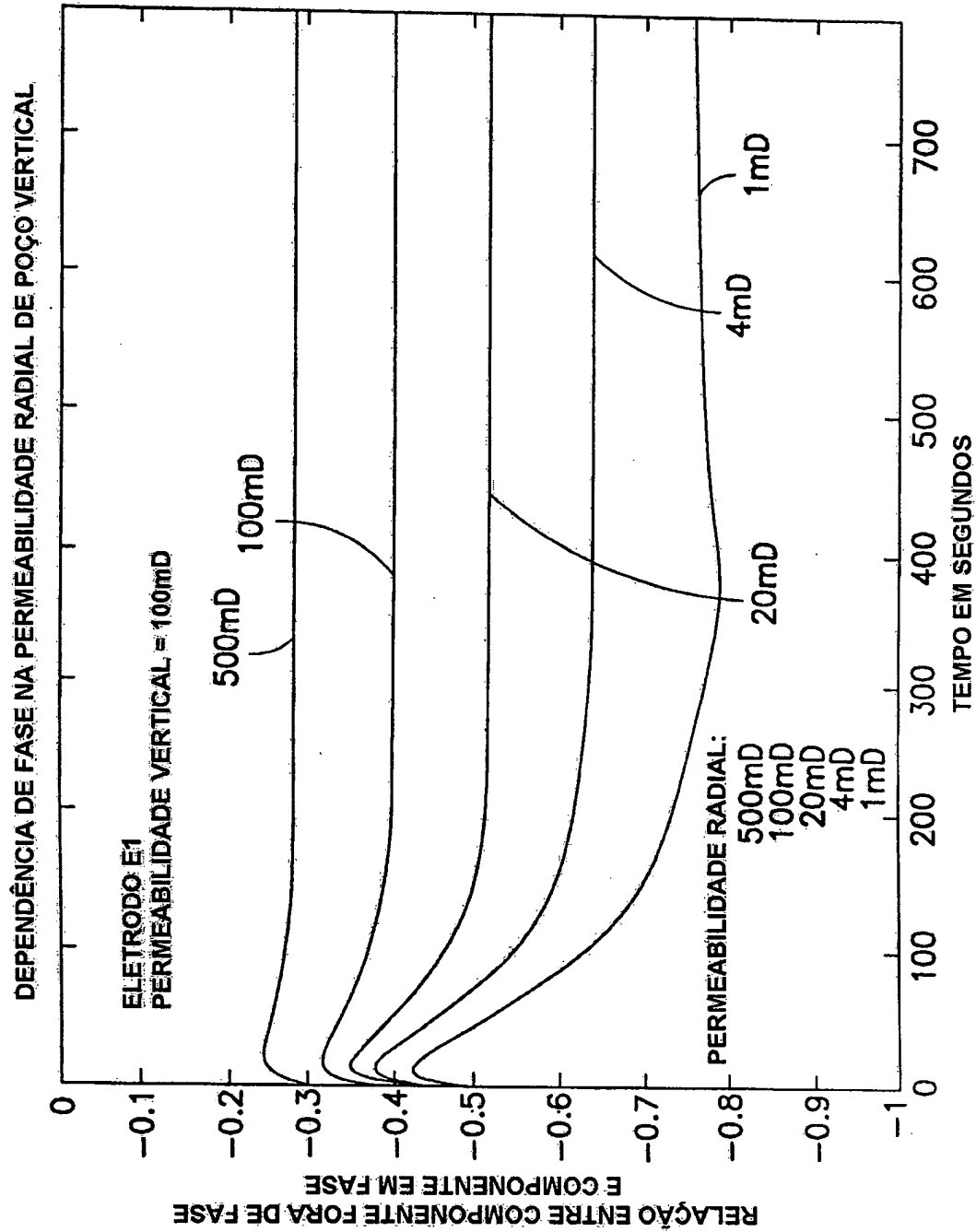


FIG.28

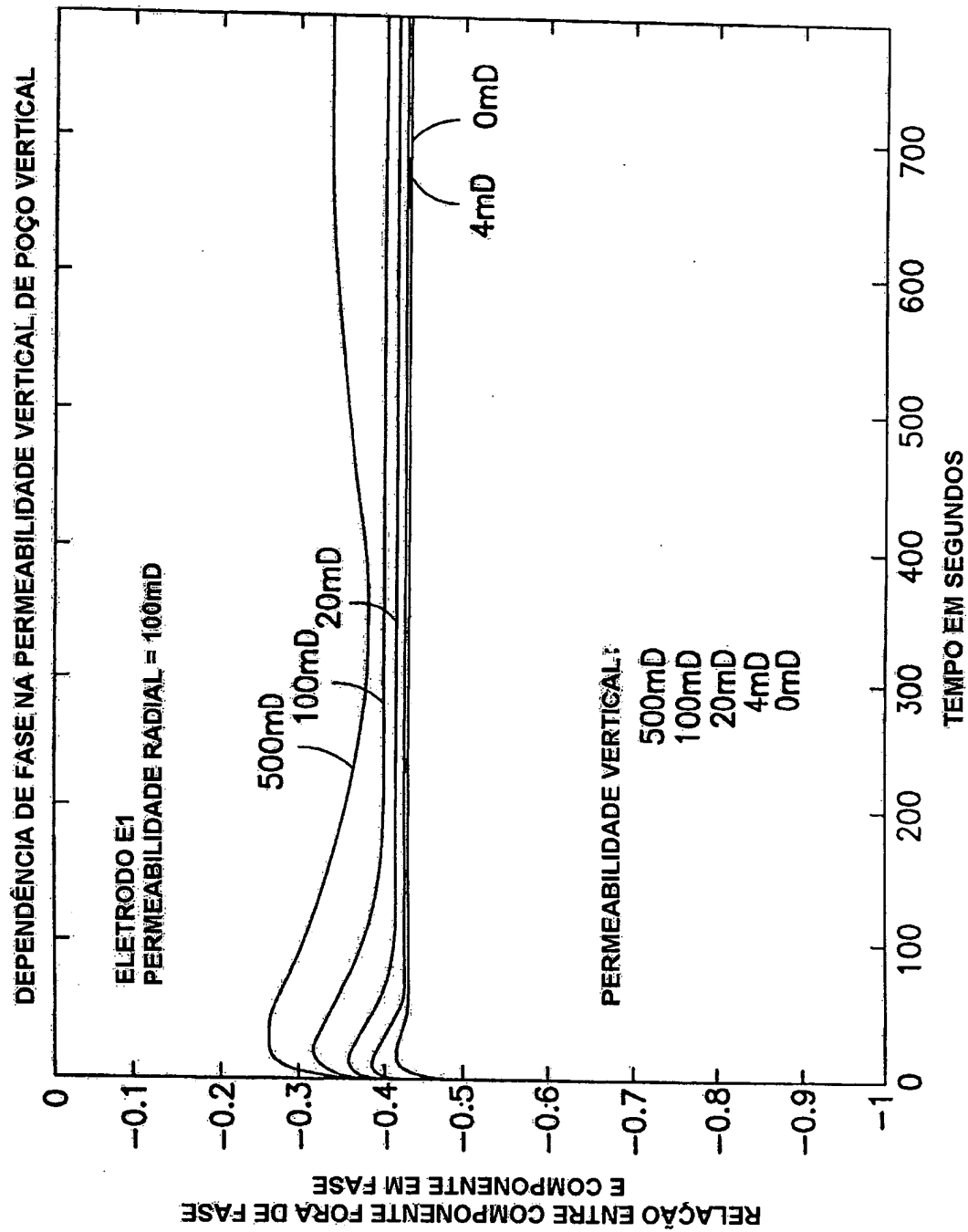


FIG.29

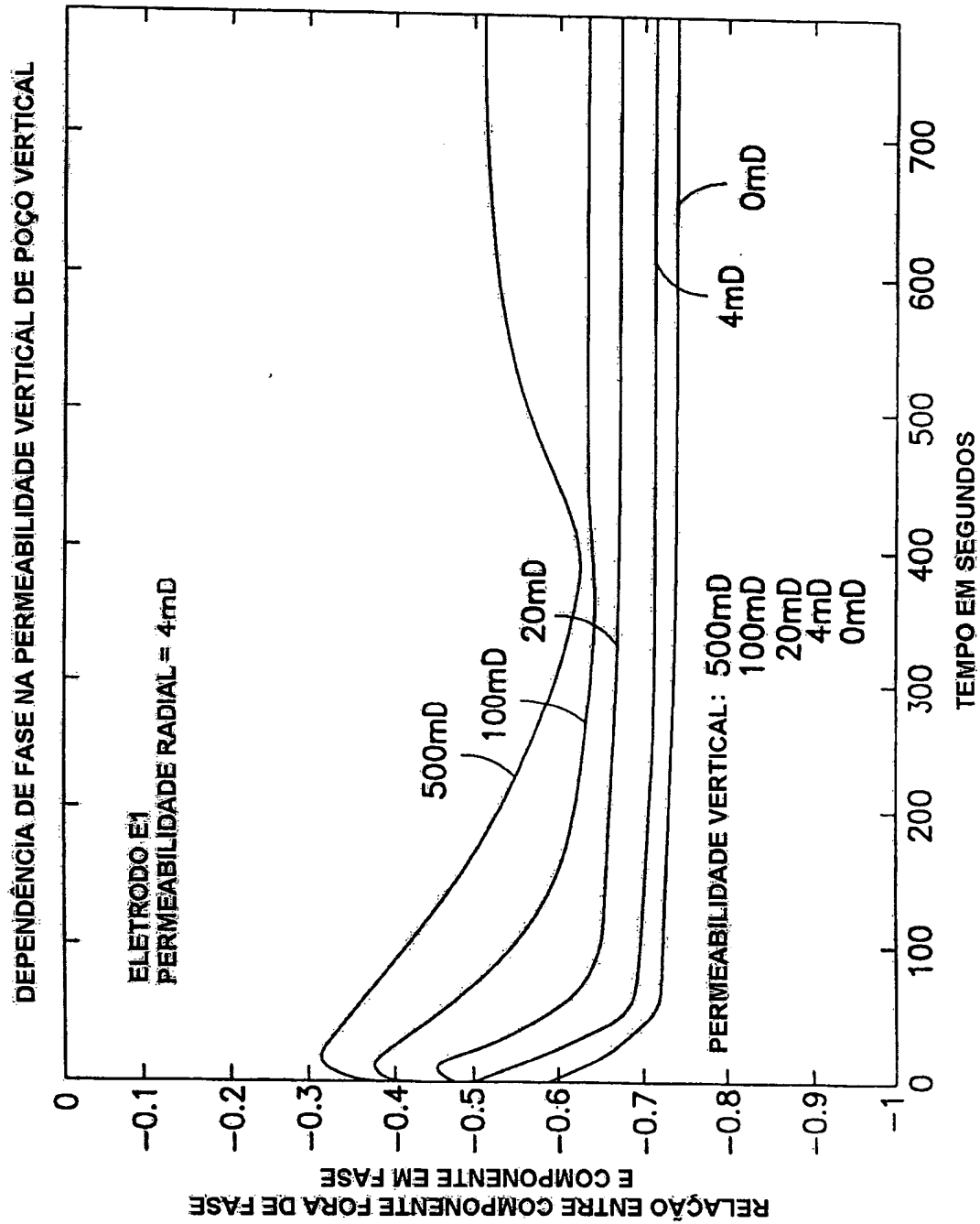


FIG.30

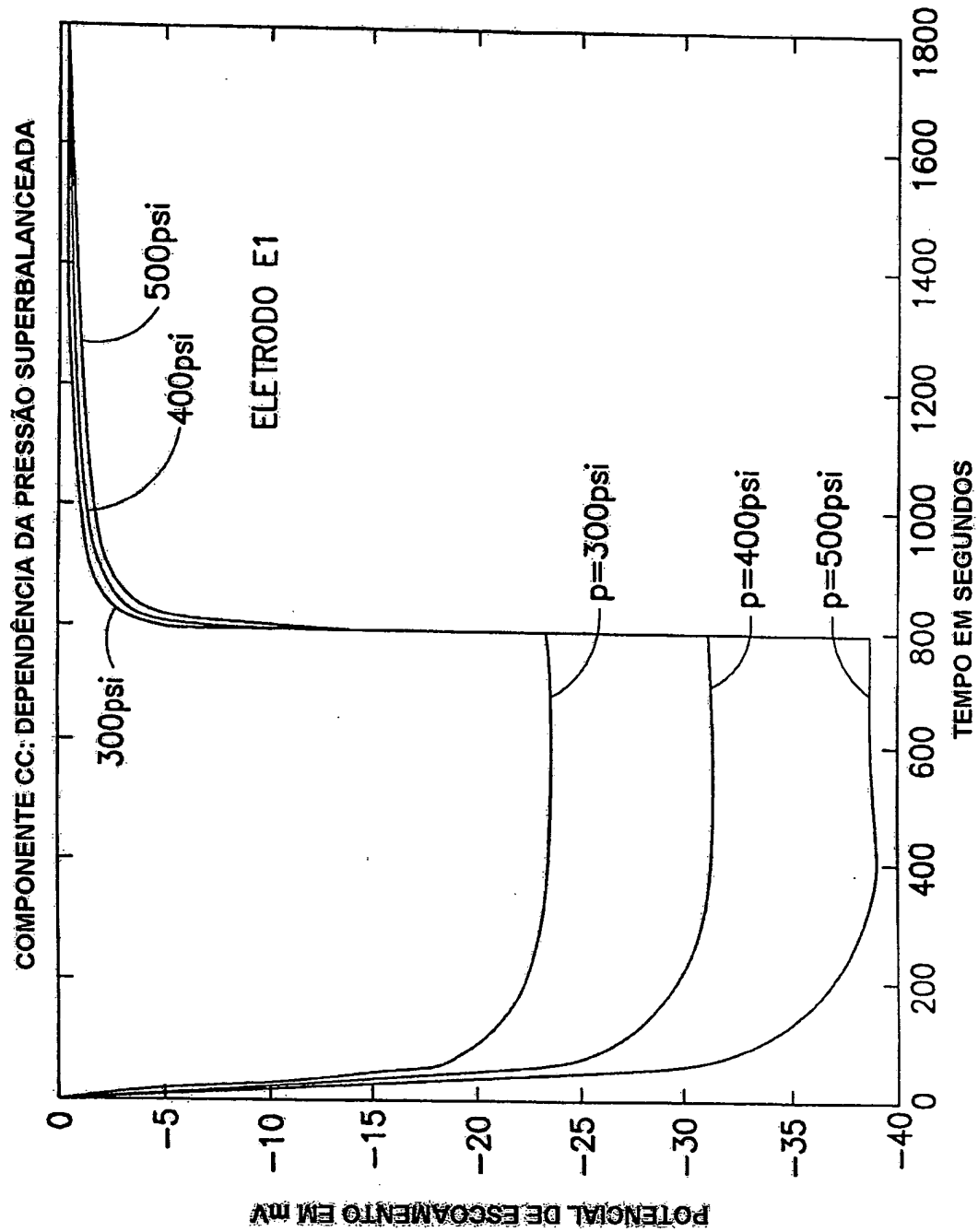


FIG.31

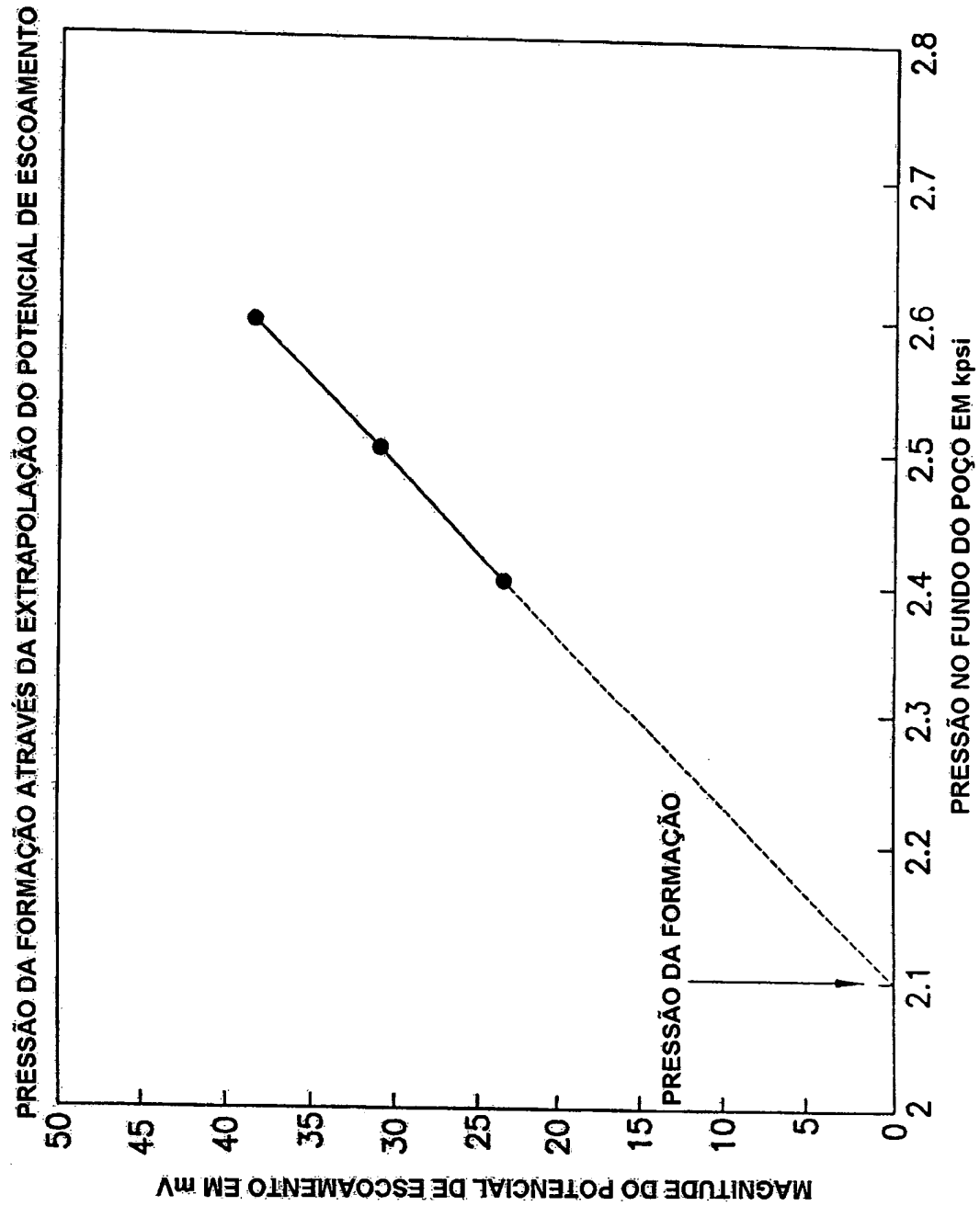


FIG.32

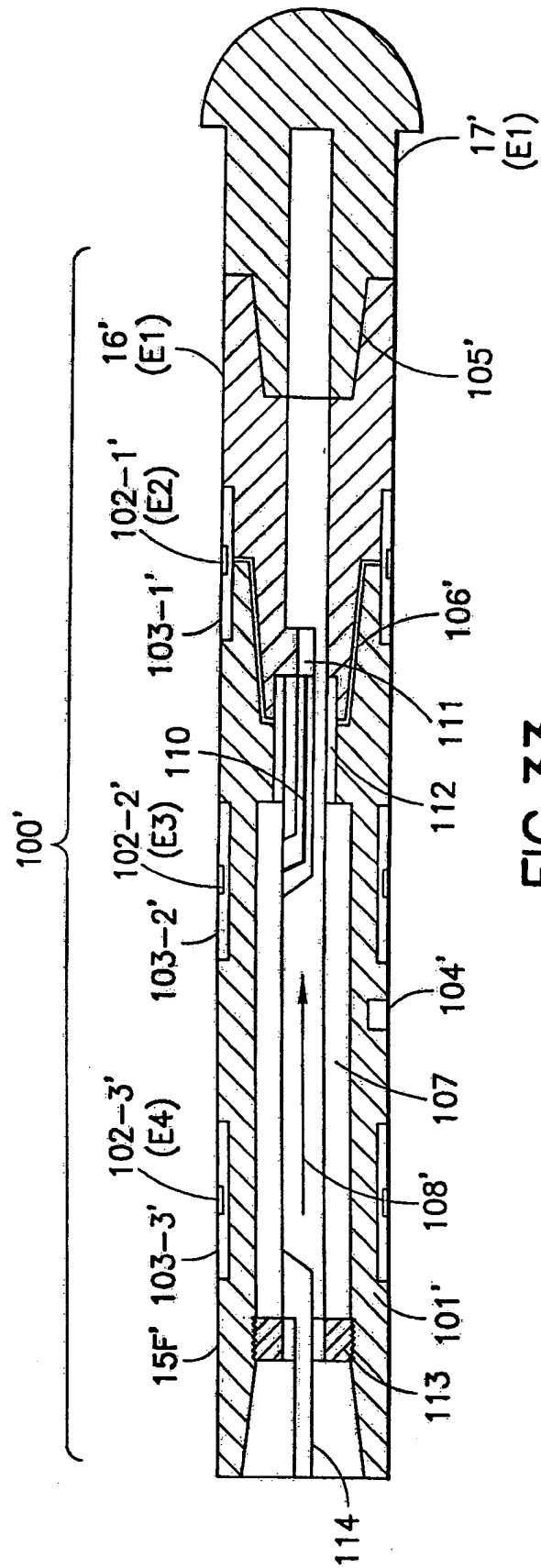


FIG.33

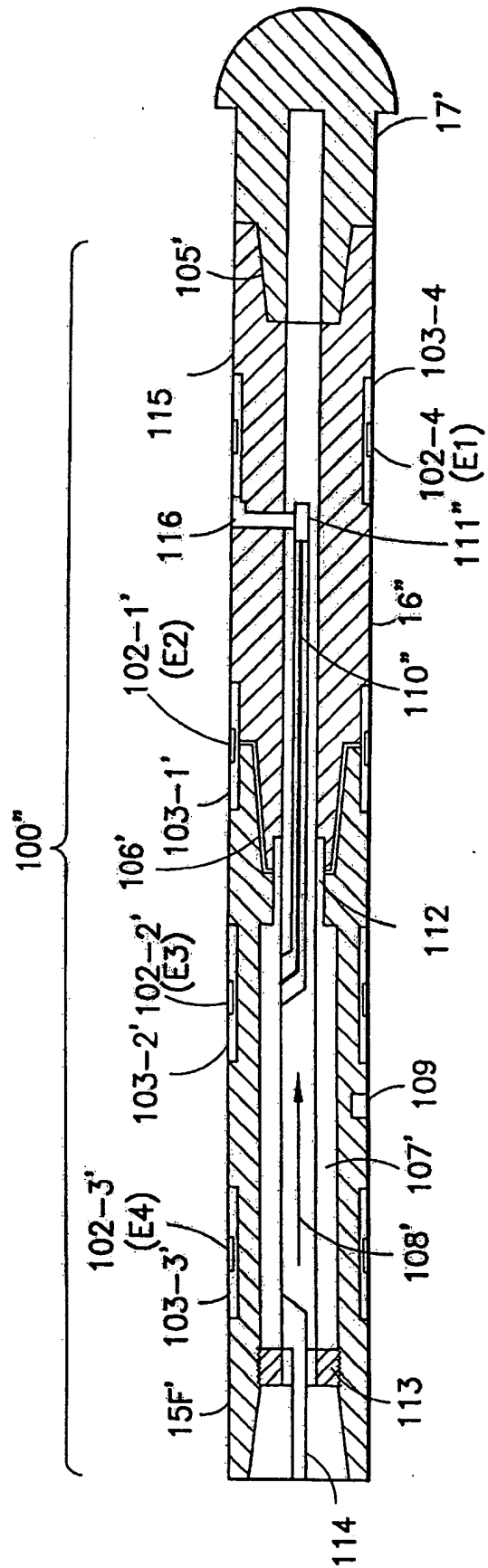


FIG.34

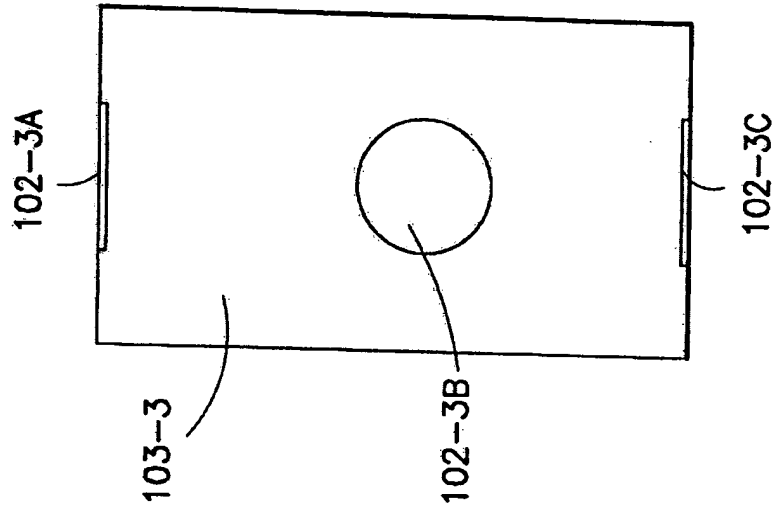


FIG. 35B

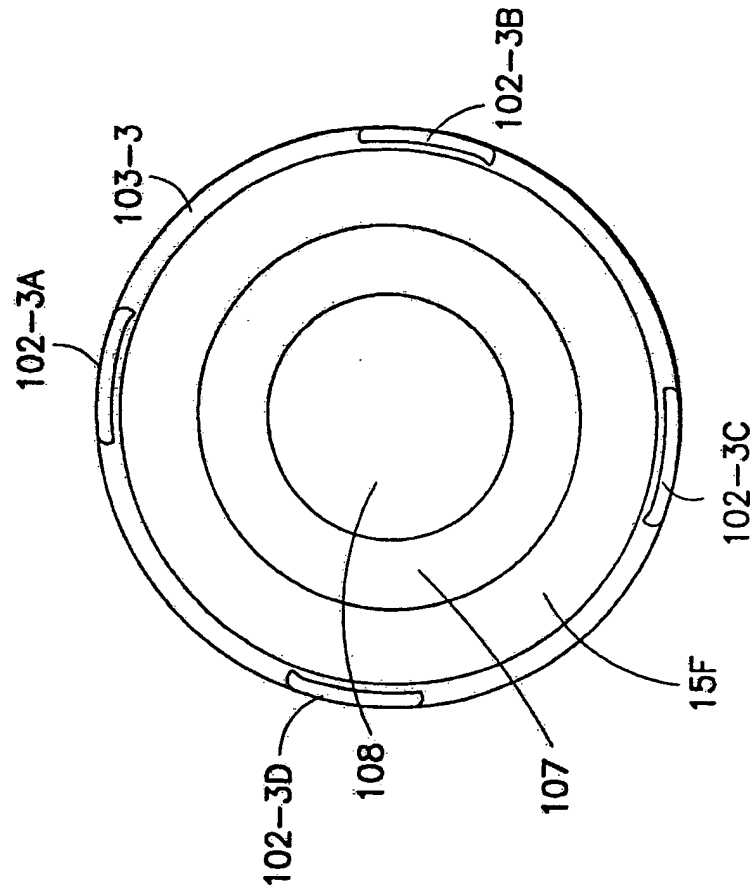


FIG. 35A

## - RESUMO -

APARELHO PARA INVESTIGAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE ATRAVESSADA  
POR UM FURO DE POÇO

São fornecidos um aparelho e metodologias de  
5 perfuração com perfilagem para medir potencial de  
escoamento em uma formação terrestre. O aparelho e  
metodologias podem ser utilizados para localizar  
informações relevantes sobre as operações de perfuração. De  
modo particular, visto que a medição do potencial de  
10 escoamento se refere diretamente ao fluxo de fluido, as  
medições do potencial de escoamento podem ser usadas, para  
localizar informações relevantes sobre as operações de  
perfuração, tais como condições de perfuração sub-  
balanceada, pressões anormais na formação, fraturas  
15 abertas, a permeabilidade da formação, e pressão da  
formação.