

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

*Determinação de Permeabilidade
de
Estruturas Porosas*

DEDALUS - Acervo - EPMT



3180004113

Daniel Moreira Guarnieri

1996

Determinação da Permeabilidade de Materiais Porosos

Daniel Moreira Guarnieri

Orientador: Prof. Dr. José Deodoro Trani Capocchi

Índice

1. Introdução	pág. 04
2. Teoria	pág. 05
2.1 Tubos Capilares	pág. 05
2.2 Estruturas Metálicas Porosas	pág. 08
2.3 Modelos para os coeficientes de fluxo	pág. 14
3. Método para a predição do comportamento quanto à permeabilidade de estruturas porosas	pág. 20
4. Aplicação da metodologia	pág. 22
5. Materiais e Métodos	pág. 24
6. Resultados	pág. 26
7. Conclusões	pág. 28
8. Anexo I	pág. 30
9. Anexo II	pág. 43
10. Bibliografia	pág. 45

1. Introdução

Geralmente as medidas de permeabilidade oferecem duas alternativas básicas para seu uso prático:

1. suprir diretamente dados sobre as propriedades do fluxo em uma estrutura porosa, e
2. prover meios para medidas indiretas de propriedades internas da estrutura, como tamanho de poro e área superficial.

O objetivo do presente trabalho é fazer uma revisão teórica da permeabilidade como uma variável envolvida no processo de filtragem e propor uma metodologia para análise de permeabilidade de materiais porosos.

2. Teoria

2.1 Tubos Capilares

Os modelos matemáticos fornecem dados sobre o fluxo através de tubos capilares podem ser representados de três formas: Fluxo Molecular, Laminar e Misto, dependendo da pressão de gás no sistema, dimensões do tubo, tipo de gás e temperatura a que o mesmo está submetido. Antes de se iniciar o estudo de cada modelo propriamente dito deve-se definir a velocidade e o livre caminho médio das moléculas.

A velocidade das moléculas ao longo de um tubo capilar, para baixas pressões de gás, é proporcional a temperatura absoluta dividida pelo peso molecular do fluido:

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (1)$$

onde v é a velocidade molecular, k é a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta e m o peso molecular.

A distância média percorrida pela molécula do gás, entre colisões intermoleculares, ou seja, seu livre caminho médio é

inversamente dependente da densidade do gás, e portanto da pressão, como segue:

$$\lambda = \frac{m}{\pi \rho \delta^2 \sqrt{2}} \quad (2)$$

onde λ é o livre caminho médio, ρ a densidade do gás e δ o diâmetro da molécula.

2.1.1 O *Fluxo Molecular* ocorre para baixas pressões de gás, onde a viscosidade do gás é independente da pressão, podendo o fluxo ser entendido como um processo de difusão que acontece quando o diâmetro do tubo ($2a$) é 100 vezes menor que seu comprimento (L), ou seja, quando o diâmetro do poro é muito menor que o livre caminho médio do fluxo gasoso. Tem-se como regra que o fluxo molecular predomina quando a relação λ/a é maior que 1, sendo o fluxo gasoso governado pela colisão das moléculas com as paredes do tubo. A vazão do sistema é dada por:

$$Q = \frac{2 \pi \sqrt{(8/\pi)} a^3 \Delta P \sqrt{(kT/m)}}{3L} \quad (3)$$

onde Q é a vazão de fluido, sendo sua unidade definida como o produto da vazão volumétrica pela pressão na qual esta é medida, a é o raio do tubo, L o comprimento do tubo e ΔP a queda de pressão através do tubo, sendo a conversão de Q para a vazão para

a vazão padrão é conseguida por sua divisão pela pressão atmosférica.

Sob condições normais, à temperatura ambiente e a uma atmosfera de pressão, o livre caminho médio para o nitrogênio é $0,06\mu$, sendo que a altas pressões ou temperaturas este valor pode ser ainda menor. O fluxo molecular pode ser conseguido para pressões absolutas de aproximadamente 0,02 atm em estruturas com poros de tamanho menor ou igual a $3,0\mu$.

2.1.2 O *Fluxo Laminar*, ou viscoso, ocorre quando há o aumento da pressão e por conseguinte da densidade, o que implica numa diminuição do livre caminho médio fazendo com que as colisões intermoleculares predominem sobre as colisões com as paredes do tubo. Quando a relação λ/a é menor que 0,01; ou seja, as dimensões do tubo são muito maiores que o livre caminho médio das moléculas, o fluxo viscoso pode ser tratado, para tubos retos, pela equação de Hagen-Poiseuille:

$$Q = \frac{\pi a^4 \bar{P} \Delta P}{8\mu L} \quad (4)$$

onde \bar{P} é a pressão média e μ a viscosidade do fluido.

2.1.3 O *Fluxo Misto* ocorre na faixa intermediária onde $0,01 < \lambda/a < 1$, onde o fluxo gasoso já não é independente da pressão, caracterizando-se por possuir componentes de fluxo viscoso e molecular, portanto a equação do fluxo viscoso torna-se:

$$Q = \frac{\pi a^4 \bar{P} [1 + (4\theta/a)] \Delta P}{8\mu L} \quad (5)$$

onde o coeficiente de escorregamento θ pode ser igualado, em primeira aproximação, ao livre caminho médio das moléculas de gás.

2.2 Estruturas Metálicas Porosas

Há uma evidente analogia entre sistemas de geometria simples, como tubos capilares, e as estruturas porosas produzidas por metalurgia do pó.

As estruturas porosas metálicas são compostas por uma intrincada rede de poros não-cilíndricos, os quais possuem seções transversais irregulares, comprimentos variados e um entrelaçamento tortuoso. A precisão no modelamento matemático, em relação aos tubos capilares, diminui a medida que a complexidade de estrutura aumenta.

A baixas pressões, o fluxo através de uma amostra porosa tem comportamento similar ao fluxo em tubos capilares. Desta

maneira, para o caso onde o livre caminho médio é substancialmente maior que a dimensão dos poros, temos:

$$Q = \sqrt{\frac{\gamma A \Delta P (kT/m)}{t}} \quad (6)$$

sendo A a área da seção transversal, t a espessura da amostra e γ uma constante do material relacionada com a geometria dos poros que não pode ser deduzida a partir de considerações geométricas simples.

Em primeira análise a permeabilidade de uma amostra porosa num fluxo laminar é dada pela Lei de Darcy. Para um fluido incompressível, o fluxo se relaciona com o gradiente de pressão da seguinte forma:

$$Q = \frac{\alpha_0 A \Delta P}{\mu t} \quad (7)$$

onde α_0 é o coeficiente de permeabilidade para um fluido incompressível.

Aqui a vazão Q é dada em termos de volume por unidade de tempo sem um termo de pressão pois o fluido é incompressível.

Para um fluxo gasoso, ou seja o fluido é compressível, a Lei de Darcy torna-se:

$$Q = \frac{\alpha A \bar{P} \Delta P}{\mu t} \quad (8)$$

sendo α o coeficiente de permeabilidade para um fluido compressível relacionado com α_0 de acordo com a equação (10).

A geometria dos poros determina em grande parte o coeficiente de permeabilidade, sendo que a equação de Kozeny fornece uma interpretação estrutural para este coeficiente como segue:

$$\alpha_0 = \frac{C \varepsilon^3}{\tau S^2} \quad (9)$$

onde C é chamado de constante de Kozeny (normalmente próximo de 0,5), S é a área superficial de poros, ε a porosidade e τ a tortuosidade, definida como a razão entre o comprimento efetivo do poro e o comprimento da amostra.

Como ocorreu com o modelamento de tubos capilares, há uma região de transição entre os fluxos molecular e viscoso. A existência de escorregamento é comum em fluxos gasosos através de materiais porosos a baixas pressões; desta forma o coeficiente de

permeabilidade é dependente da pressão como apontado por Klinkenberg:

$$\alpha = \alpha_0 (1 + bP) \quad (10)$$

sendo b uma constante que depende do gás e da estrutura dos poros.

Portanto a equação de Darcy torna-se:

$$Q = \frac{\alpha_0 A \Delta P \bar{P} (1 + b/P)}{\mu t} \quad (11)$$

onde o parâmetro b/P do metal poroso está relacionado com θ para tubos capilares (lembrando-se que θ varia diretamente com o livre caminho médio das moléculas e, portanto, inversamente com a pressão do gás).

A altas pressões e velocidades observa-se maiores diferenças entre o fluxo por capilares e o fluxo por metais porosos. Para altas velocidades de fluxo ocorrem perdas inerciais de energia, havendo portanto necessidade de correção da lei de Darcy por um termo de atrito não linear, proposto por Forchheimer:

$$\Delta P = \frac{t\mu Q}{\alpha_0 A} + \frac{t\rho Q^2}{\beta A} \quad (12)$$

Sendo β o coeficiente inercial de resistência.

A equação (12) pode ser modificada para uma forma mais prática por racionalização de Q para uma vazão volumétrica por unidade de área em condições padrão, ou seja $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$, então:

$$\Delta P = \frac{t\mu \dot{Q}}{\alpha_0} + \frac{t\rho \dot{Q}^2}{\beta} \quad (13)$$

Geralmente o coeficiente de permeabilidade (α_0) indica a facilidade do fluxo gasoso atravessar um material poroso, assim como o coeficiente inercial (β) mede as perdas de energia devido a mudanças de momento da fase gasosa pela tortuosidade do caminho que o fluxo deve percorrer.

Para altas pressões e velocidades de gás; ou seja, números de Reynolds próximo a 200, a turbulência invalida a equação de Darcy modificada. O começo da turbulência é dependente da velocidade real do fluido nos poros, iniciando-se por volta do número de Reynolds igual a 4.

A região do número de Reynolds entre 4 e 200 corresponde a uma diminuição na precisão das equações (12) e (13),

expressões matemáticas que descrevem o fluxo nesta faixa são baseadas no conceito de fator de atrito, que é inversamente dependente do número de Reynolds; sob estas condições o fluxo tem forte dependência da densidade do gás.

Fluxo	Vazão	Vazão
	Tubos Capilares	Materiais Porosos
Molecular	$\frac{2\pi\sqrt{(8/\pi)} a^3 \Delta P \sqrt{(kT/m)}}{3L} \quad (3)$	$\sqrt{\frac{\gamma A \Delta P (kT/m)}{t}} \quad (6)$
Laminar	$\frac{\pi a^4 \bar{P} \Delta P}{8\mu L} \quad (4)$	$\frac{\alpha_0 A \Delta P}{\mu t} \quad (7)$
Misto	$\frac{\pi a^4 \bar{P} [1 + (4\theta/a)] \Delta P}{8\mu L} \quad (5)$	$\frac{\alpha_0 A \Delta P \bar{P} (1 + b/P)}{\mu t} \quad (11)$

Tabela I - Comparação entre o Modelamento de Fluxo Gasoso para Tubos Capilares e Materiais Porosos.

A equação (13) é verificada para materiais porosos em uma larga faixa de pressão e para diferentes gases, sendo aplicável para vazões variando de 0,1 a 20 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$; ou seja uma faixa de permeabilidade entre 3 e 3000 milidarcy.¹

¹Um material que possua a permeabilidade de 1 darcy terá um fluxo de 1 cm^3/s de um líquido com 1 centipoise de viscosidade através da face de um cubo de 1 cm^3 sob ação de um diferencial de pressão de 1 atm.

2.3 Modelos para os coeficientes de fluxo

Há evidências que a porosidade interconectada (ε), a área superficial de poros (S_v), o tamanho médio de poro (D) e o tamanho médio das partículas (d) influenciam fortemente os coeficientes de fluxo para materiais porosos; além da forma da partícula e do poro serem fatores adicionais de dependência.

Pode-se dividir o estudo do correlacionamento dos coeficientes de fluxo com os parâmetros estruturais dos materiais porosos em três linhas básicas:

1. Coeficiente de permeabilidade em função da porosidade e tamanho de poro: $\alpha = \alpha(\varepsilon, D_b^{\max})$ ou $\alpha = \alpha(\varepsilon, D_p)$;
2. Análise microestrutural; onde os coeficientes de permeabilidade são relacionados com a fração volumétrica de porosidade e área superficial relacionados de poros por unidade de volume:
 $\alpha = \alpha(\varepsilon, S_v)$ e $\beta = \beta(\varepsilon, S_v)$;
3. Coeficientes de permeabilidade em função da porosidade e tamanho médio de partícula: $\alpha = \alpha(\varepsilon, d)$ e $\beta = \beta(\varepsilon, d)$;

2.3.1 Coeficiente de permeabilidade em função da porosidade e tamanho do poro:

Cliffel propôs que o coeficiente de permeabilidade viscoso se relaciona com o produto $D_p \cdot \varepsilon$, enquanto Smith e Brown mostraram

que α pode ser relacionado tanto com $D_p \cdot \varepsilon$ quanto com $D_b^{\max} \cdot \varepsilon$, obtendo-se precisão equivalente, então:

$$\alpha = k_3 (\varepsilon \cdot D_p)^{1,871} \quad (14) \text{ Clifel et alli}$$

$$\alpha = 0,0048 (\varepsilon \cdot D_p)^{1,85} \quad (15) \text{ Smith e Brown}$$

$$\alpha = 0,00059 (\varepsilon \cdot D_b^{\max})^{1,70} \quad (16) \text{ Smith e Brown}$$

onde α é o coeficiente de permeabilidade viscoso (m^2), k_3 é um fator de conversão e D_p é o tamanho médio de poro determinado por porosimetria de mercúrio, D_b^{\max} é o tamanho máximo de poro determinado pelo teste do ponto de bolha. Sendo as equações acima aplicadas para a maioria das estruturas porosas pois foram obtidas independentemente da forma inicial, tamanho e condições de processo.

2.3.2 Análise Microestrutural

A análise microestrutural, em estruturas metálicas porosas, relaciona os coeficientes de permeabilidade com a fração volumétrica de porosidade e a área superficial de poros por unidade de volume, ambos determinados por metalografia quantitativa; para tanto se utiliza a equação de Kozeny (9), as expressões propostas por Ergun e Orning:

$$\alpha = \frac{k_1 \varepsilon^3}{S_\nu^2 (1-\varepsilon)^2} \quad (17) \quad \text{Ergun e Orning}$$

$$\beta = \frac{k_2 \varepsilon^3}{S_\nu (1-\varepsilon)} \quad (17) \quad \text{Ergun e Orning}$$

onde k_1 e k_2 são constantes geométricas e as partículas consideradas são esféricas.

Autores como Kozeny, Carman, Ergun entre outros; considerando o modelamento para um fluxo de fluido incompressível através de uma camada de pó compactado, estimaram que a relação entre α , ε e S_ν tem a seguinte forma:

$$\alpha = \frac{\varepsilon^3}{S_\nu^2} \quad (19)$$

Este modelo não leva em conta nem a dependência da morfologia dos poros; ou seja, o caminho real que o fluido percorre pode ser substancialmente maior que a dimensão da amostra na direção do fluxo, nem o possível efeito da rugosidade superficial do poro exceto aquele contido em S_ν . A análise de dados em fluxo viscoso para amostras sugere que τ e ε se relacionam através de:

$$\tau = 1,25 \varepsilon^{-1} \quad (20)$$

Então a partir da substituição de (9) e (20) em (19) obtém-se:

$$\alpha = 0,4 \left(\frac{\varepsilon^{4,1}}{S_v^2} \right) \quad (21)$$

Analogamente pode-se estimar o coeficiente inercial β pela equação de Meyer e Smith, para filtros metálicos produzidos a partir de pós atomizados a água:

$$\beta = 9,1 \left(\frac{\varepsilon^{5,1}}{S_v^2} \right) \quad (22)$$

2.3.3 Coeficiente de Permeabilidade em função da Porosidade e do Tamanho Médio de Partícula

Uma relação simplificada entre o coeficiente de permeabilidade viscoso (α) e o tamanho médio de partícula é dada pela expressão:

$$\alpha = k_4 d^{2,18} \quad (23) \quad Robinson$$

onde k_4 é uma constante.

No caso de partículas com forma uniforme, a área superficial de poros será altamente dependente do tamanho inicial das partículas. Um maior tamanho inicial de partícula irá diminuir a área superficial de poros, para dado nível de porosidade. Assim o coeficiente de permeabilidade deve aumentar com a elevação do nível de porosidade e do tamanho de partícula, portanto $\alpha = \alpha(\varepsilon, d)$.

As equações (17) e (18) sugerem que o coeficiente inercial é proporcional ao coeficiente de permeabilidade viscoso (α), porosidade e área superficial de poros, assim também $\beta = \beta(\varepsilon, d)$.

German obteve para filtros de aço inox 316L as seguintes relações:

$$\alpha = 4,6 \cdot 10^{-11} (d^{0,73})(\varepsilon^{6,8}) \quad (24)$$

$$\beta = 3,9 \cdot 10^{-6} (d^{0,92})(\varepsilon^{6,4}) \quad (25) \text{ ou}$$

$$\beta = 5,5 \cdot 10^{18} (\alpha \rho / d)^{1,3} \quad (26)$$

onde $\rho = (1 - \varepsilon)$.

Smith e Marth apresentam, também para o aço inox 316L, consolidados a altas pressões e sinterizados a baixas temperaturas por curto período de tempo os seguintes dados:

$$\alpha = 4,8 \cdot 10^{-13} (d^{1,3}) (\varepsilon^{4,8}) \quad (27)$$

$$\beta = 4,8 \cdot 10^{11} (\alpha \rho / d)^{1,3} \quad (28)$$

Qualitativamente, quando a forma do poro torna-se mais arredondada o expoente da porosidade aumenta e o tamanho inicial de partícula tem menor influência sobre o coeficiente inercial. Em ambos os casos a porosidade e o tamanho de partícula são fatores determinantes para as características do fluxo.

3. Métodos para a predição do comportamento quanto a permeabilidade de Estruturas Porosas

A figura anexa no final do trabalho ilustra esquematicamente o equipamento pelo qual se mede a vazão de gás em função da pressão de entrada do sistema e do gradiente de pressão no filtro, substituindo-se essa variáveis na equação (12) tem-se os coeficientes α e β .

Pelo desenvolvimento teórico formulado anteriormente tem-se que os coeficientes de permeabilidade podem ser avaliados por dois métodos básicos:

1º. A partir da relação entre os coeficientes de permeabilidade viscoso (α) e inercial (β) e as variáveis de processamento ε e D_p ou D_b^{\max} como nas equações (17) ou (18) ou a partir de ε e d como mostrado nas equações (21) e (22).

2º. Em relação a características microestruturais, obtidas por metalografia quantitativa: fração volumétrica de porosidade (ε) e área superficial de porosidade por unidade de volume da amostra (S_v) através das equações (24) e (25) ou (27) e (28).

A medição da porosidade total (ε_i), no primeiro caso, é feita por densidade hidrostática e o nível de porosidade interconectada (ε), é determinado por impregnação de óleo de acordo com a norma ASTM B328-73. A porosidade interconectada deve ser maior que

85%, ou seja, a fração de porosidade total ε_i não deve ser menor que 0,15, pois abaixo desse valor a conectividade diminui bruscamente devido ao isolamento de grandes segmentos da rede de poros. A diminuição da conectividade é devido às forças de compactação ou ao excessivo crescimento de pescoço entre as partículas durante os estágios avançados da sinterização.

Para se obter os parâmetros microestruturais: ε e S_v deve-se utilizar métodos de análise automática de imagens numa amostra seccionada, impregnada a vácuo com resina epóxi e polida metalograficamente.

4. Aplicações da Metodologia

No uso de estruturas porosas em dispositivos para controle de fluxo e para filtração, a vazão de gás, para um dado gradiente de pressão é uma variável frequentemente especificada. Resolvendo-se a equação (13) para a vazão volumétrica em função do fluxo obtém-se uma curva para uma faixa de gradientes de pressão.

Especificando-se a pressão de saída, o tipo de gás e a espessura do filtro, pode-se comparar ou avaliar filtros simplesmente empregando seus coeficientes α e β conseguidos através de ensaios normalizados (ε e d), (ε e D_p) e (ε e D_b^{\max}) ou metalograficamente por (ε e S_v), sendo possível a comparação com os coeficientes viscoso e inercial determinados por medidas de permeabilidade.

Outro ponto a se destacar é a possibilidade de obtenção de filtros com características de fluxo, tanto α quanto β , similares partindo-se de pós (no caso dos filtros metálicos produzidos por sinterização) com diferentes tamanhos de partícula e porosidade, mantendo-se o ciclo de sinterização; ou seja, estes filtros possuem microestruturas bem diferentes no que diz respeito ao tamanho dos poros e sua distribuição, mas a curva que relaciona a vazão com o gradiente de pressão através de amostra são próximas.

Não há dúvidas que outras combinações de porosidade, tamanho de partículas inicial do pó, pressão de compactação e ciclos de sinterização podem ser utilizadas na fabricação de filtros para promover as mesmas características de fluxo.

Assim mantendo-se uma dada permeabilidade, mas mudando a estrutura de poros e densidade pode-se escolher mais de uma razão de filtragem (filter rating) e/ou resistência mecânica para uma particular aplicação.

5. Materiais e Métodos

No presente trabalho foram estudados filtros de monel, constituídos de 70% de Níquel e 30% de Cobre, obtidos por sinterização de pós de diferentes granulometrias sob diferentes pressões.

Foram ainda conduzidos ensaios em filtros de aço inoxidável 316L e em filtros de bronze, mas devido ao menor número de amostras os resultados obtidos não são aqui apresentados.

Os pós de monel utilizados para a confecção dos filtros foram separados por peneiramento nas seguintes faixas granulométricas:

	Tipo de pó		
	A	B	C
Granulometria	-250+105	-105+74	-105+62

Tabela II - Granulometria dos pós

O equipamento utilizado para as medidas foi um permeâmetro instalado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo.

A queda de pressão e a vazão são medidas no equipamento, sendo utilizado como fluido, de densidade e viscosidade conhecidas, ar.

A partir dos valores obtidos para a pressão de entrada, de saída, vazão e das características do filtro (área e espessura), com a ajuda de uma planilha de cálculo é possível converter os dados para unidades padrão de modo a tornar aplicável a equação de Forchheimer (13). Por meio de um software gráfico, plotam-se curvas $\Delta P/t \times \dot{Q}$, fazendo regressão por um polinômio de grau dois é possível obter os coeficientes α (coeficiente de permeabilidade) e β (coeficiente inercial de resistência) característicos do filtro.

6. Resultados

Na tabela abaixo são apresentados os resultados dos coeficientes de permeabilidade e inercial de resistência para os filtros de monel estudados:

<i>Tipo de pó</i>	<i>Pressão de compactação (MPa)</i>	α_0 ($10^{-13} m^2$)	β ($10^{-8} m$)
A	zero	8175,10	1602,30
	200	20,991	449,43
	300	73,726	11,185
	400	9,3601	20,055
B	zero	33,979	23,985
	200	3,771	1,3962
	300	2,3463	2,9666
	400	1,9716	7,0103
C	zero	14,716	592,20
	200	4,1647	3,5444
	300	1,2367	0,86893
	400	10,830	0,34551

Tabela III - Pós com respectivas pressões de compactação, coeficientes de permeabilidade e inercial de resistência.

7. Conclusões

Através dos resultados obtidos foi possível verificar a dependência entre o tamanho da partícula e a permeabilidade. Quanto maior a faixa granulométrica maior a permeabilidade.

Da mesma forma pode-se relacionar a permeabilidade com a pressão de conformação. Quanto menor a pressão de compactação maior a permeabilidade.

Alguns dos resultados apresentados na tabela III podem parecer a primeira vista discrepantes, entretanto podem ser explicados por dois fatores: diferenças na fração de porosidade interconectada e ajuste da curva pelo software. O software utilizado realiza a aproximação pela melhor curva e não necessariamente pela família de curvas que rege o fenômeno.

Os valores para os coeficientes de permeabilidade e inercial de resistência se encontram próximos a valores já encontrados por outros pesquisadores em filtros de aço inoxidável 316L.

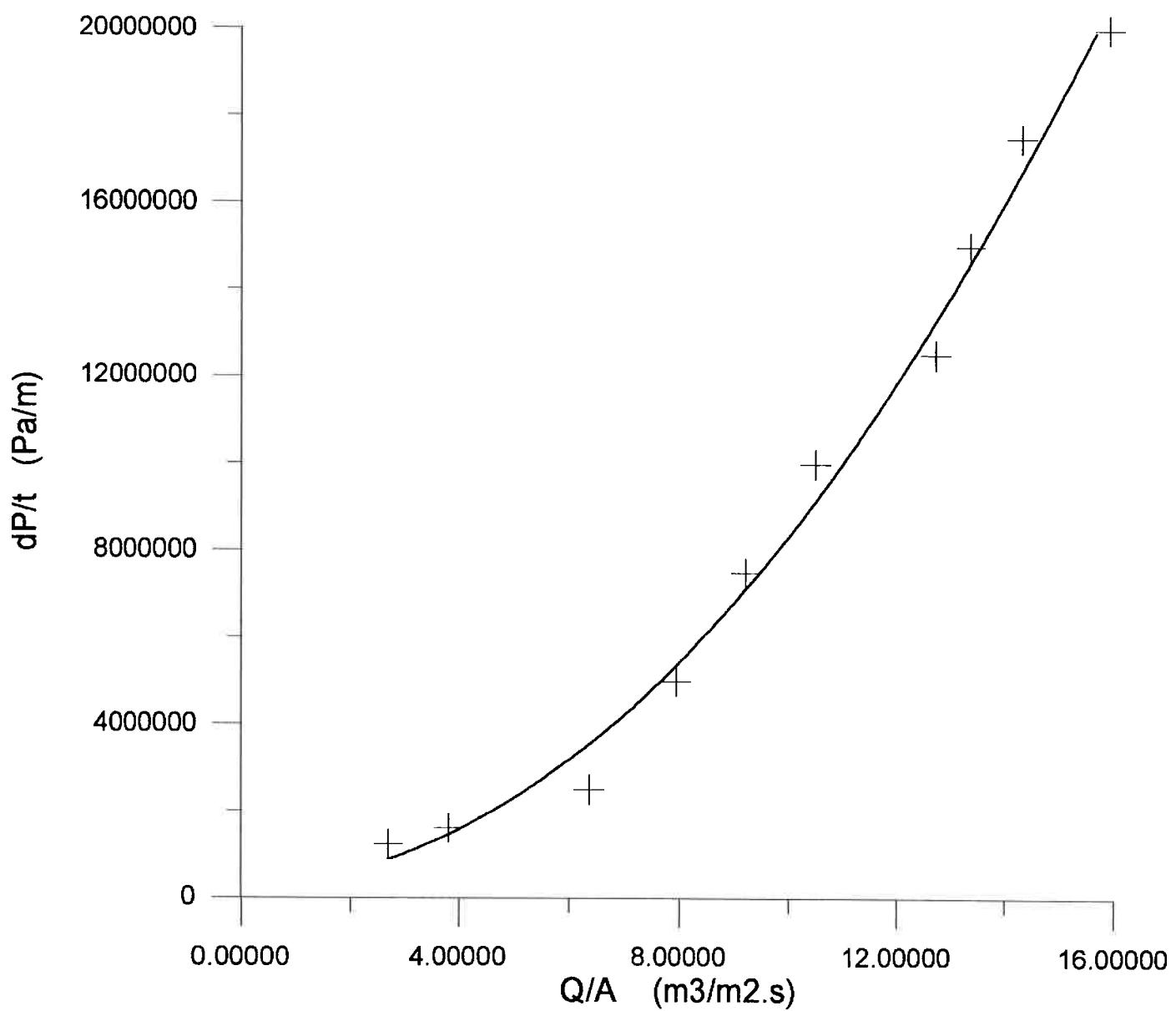
A partir desses coeficientes e baseando-se na formulação apresentada pode-se correlacionar outras propriedades do filtro.

A permeabilidade do filtro é dependente, como já dito, do tamanho da partícula e da pressão de compactação, entretanto é

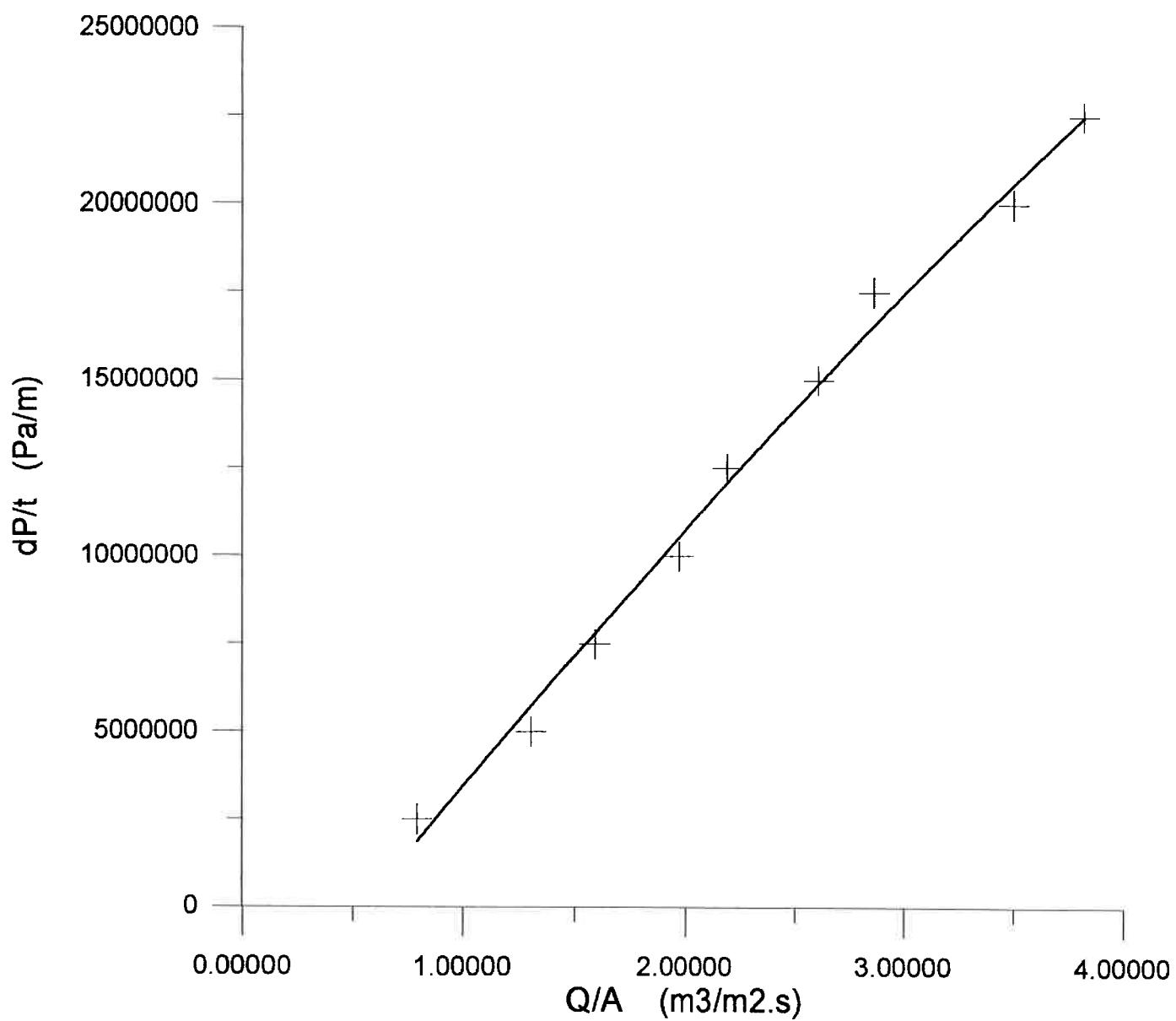
possível obter filtros com permeabilidades similares (valores próximos de coeficientes de permeabilidade e inercial de resistência) por meio de seleção de diferentes combinações de tamanho de partícula e pressão de compactação; o que permite escolher o filtro adequado para as condições de trabalho.

8. Anexo I

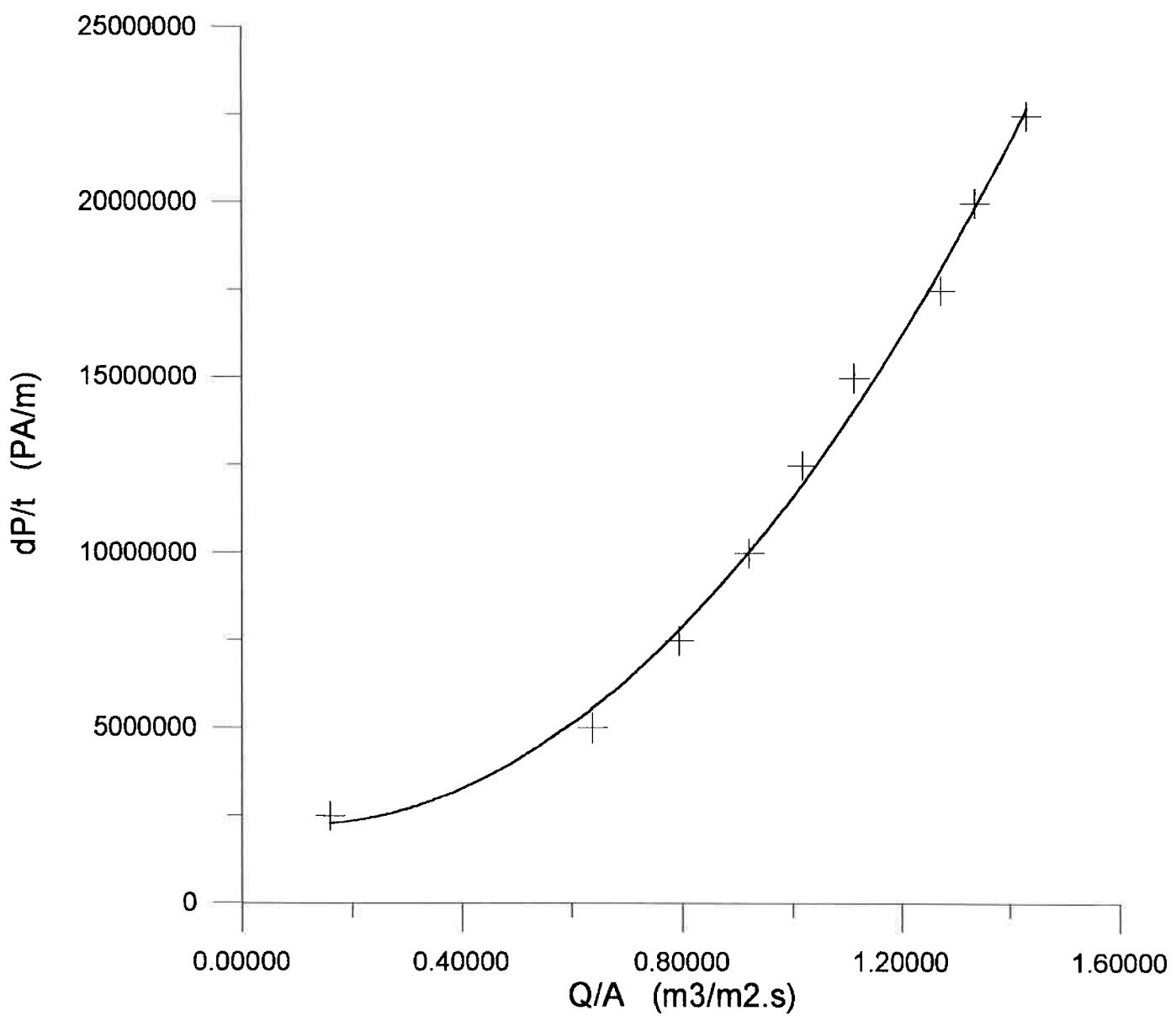
A0



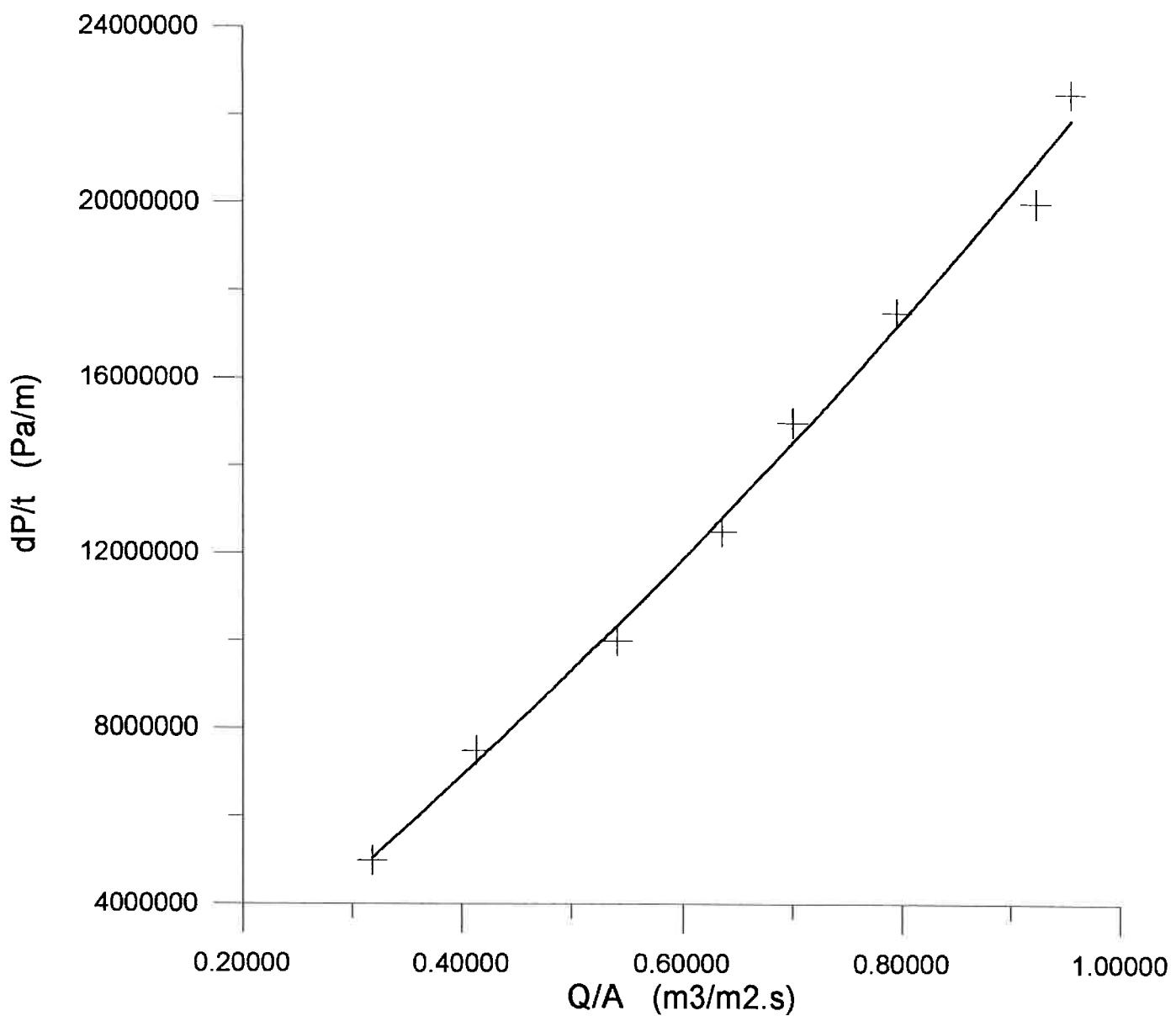
A2



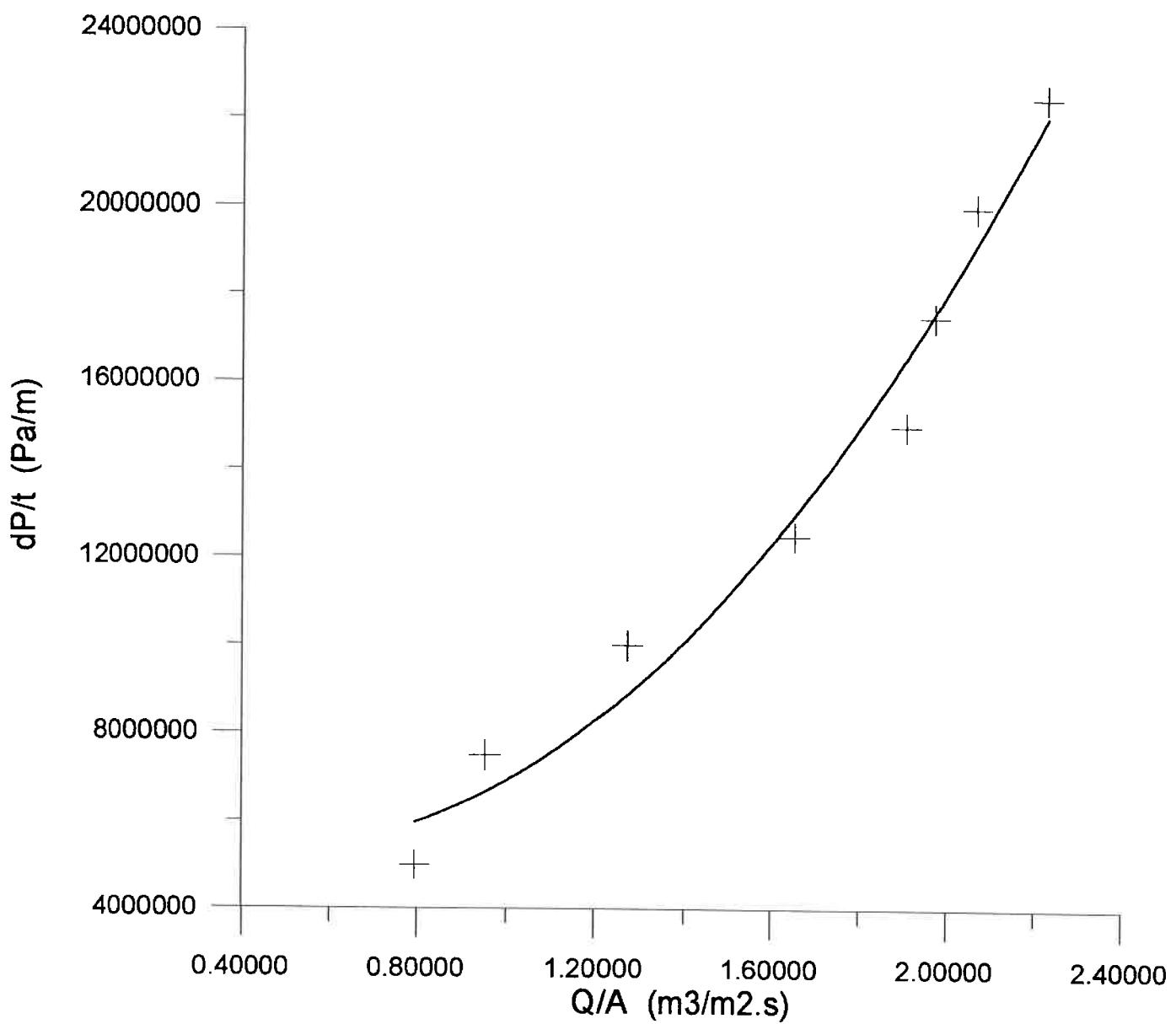
A3



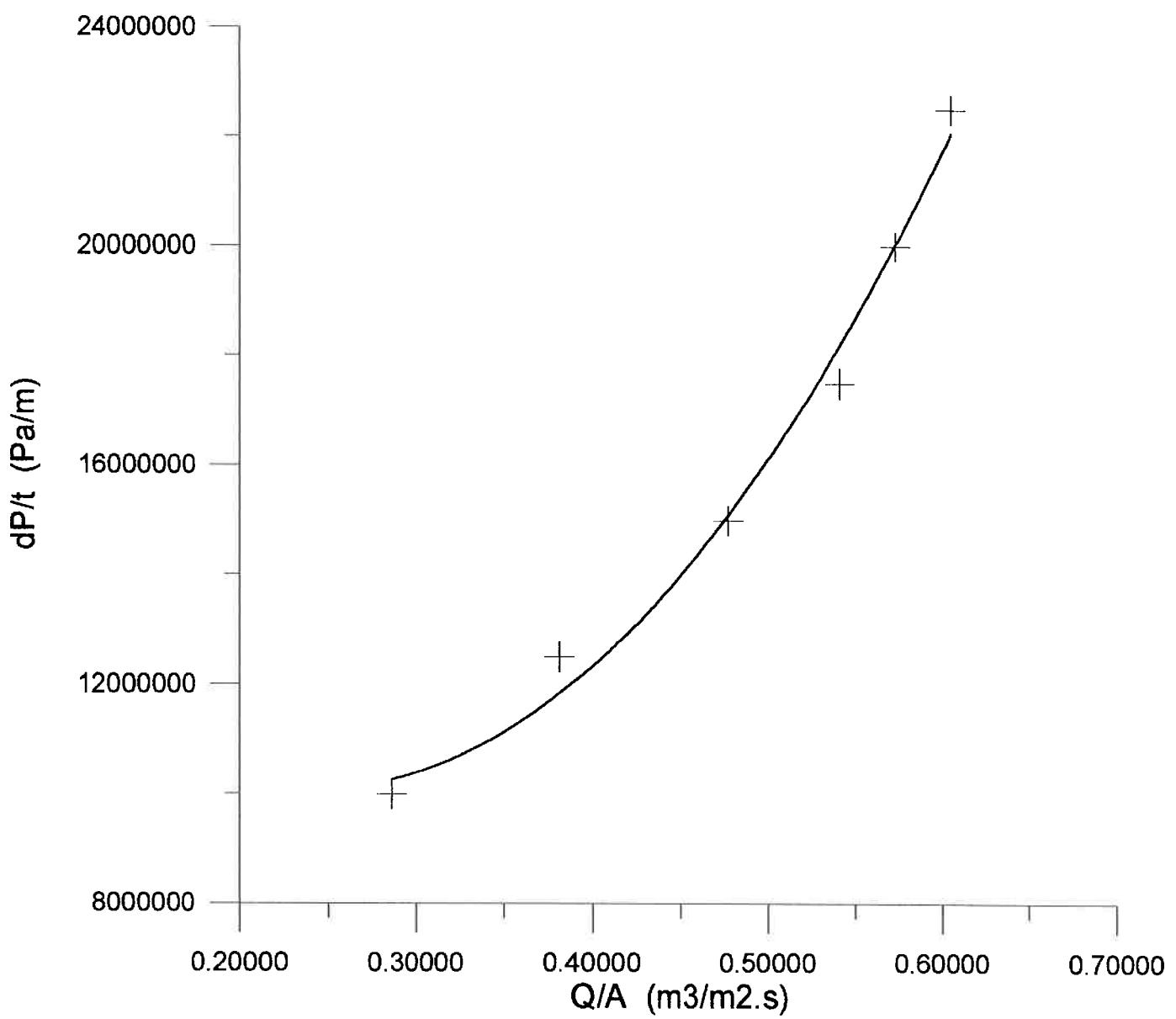
A4



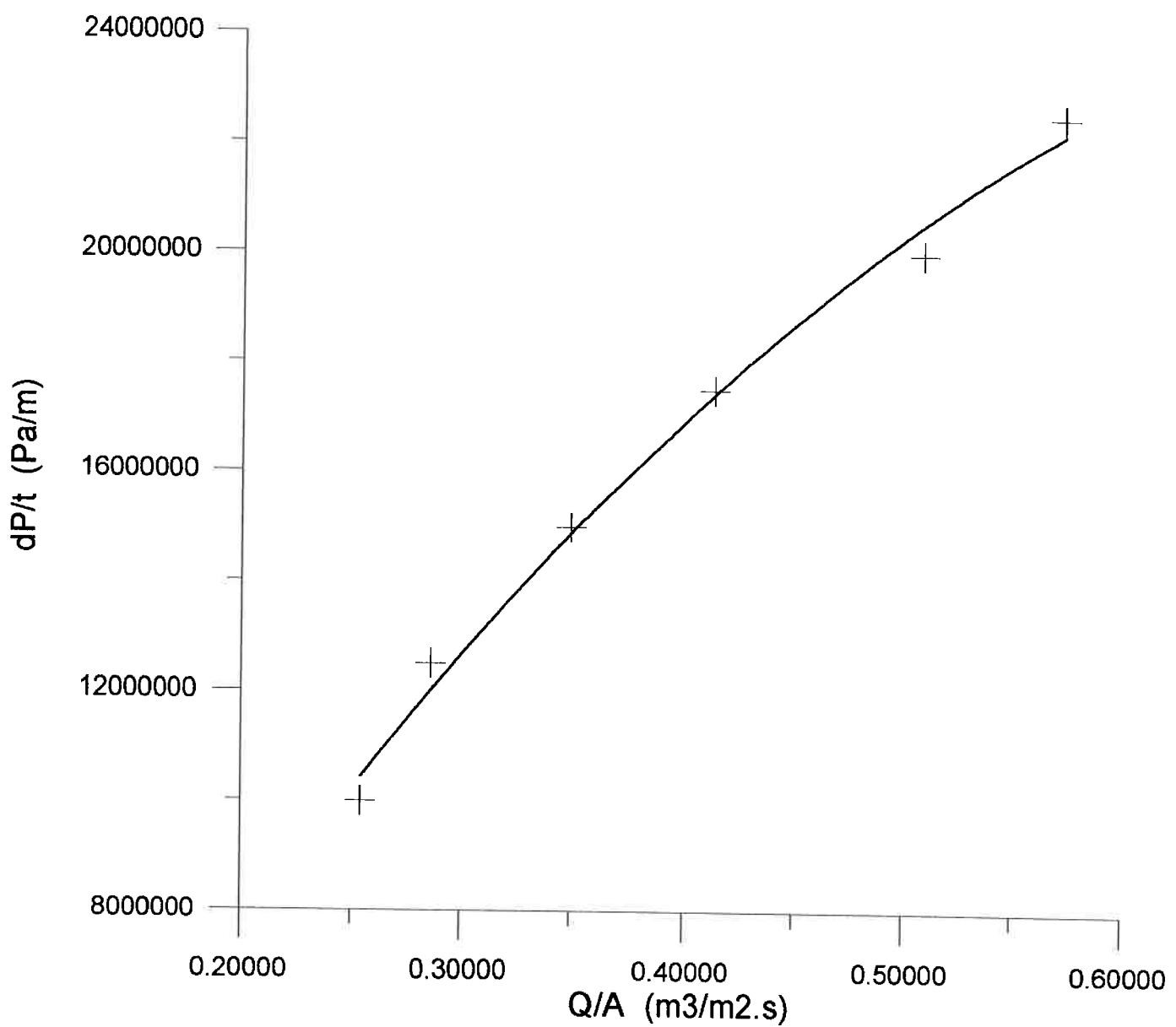
B0



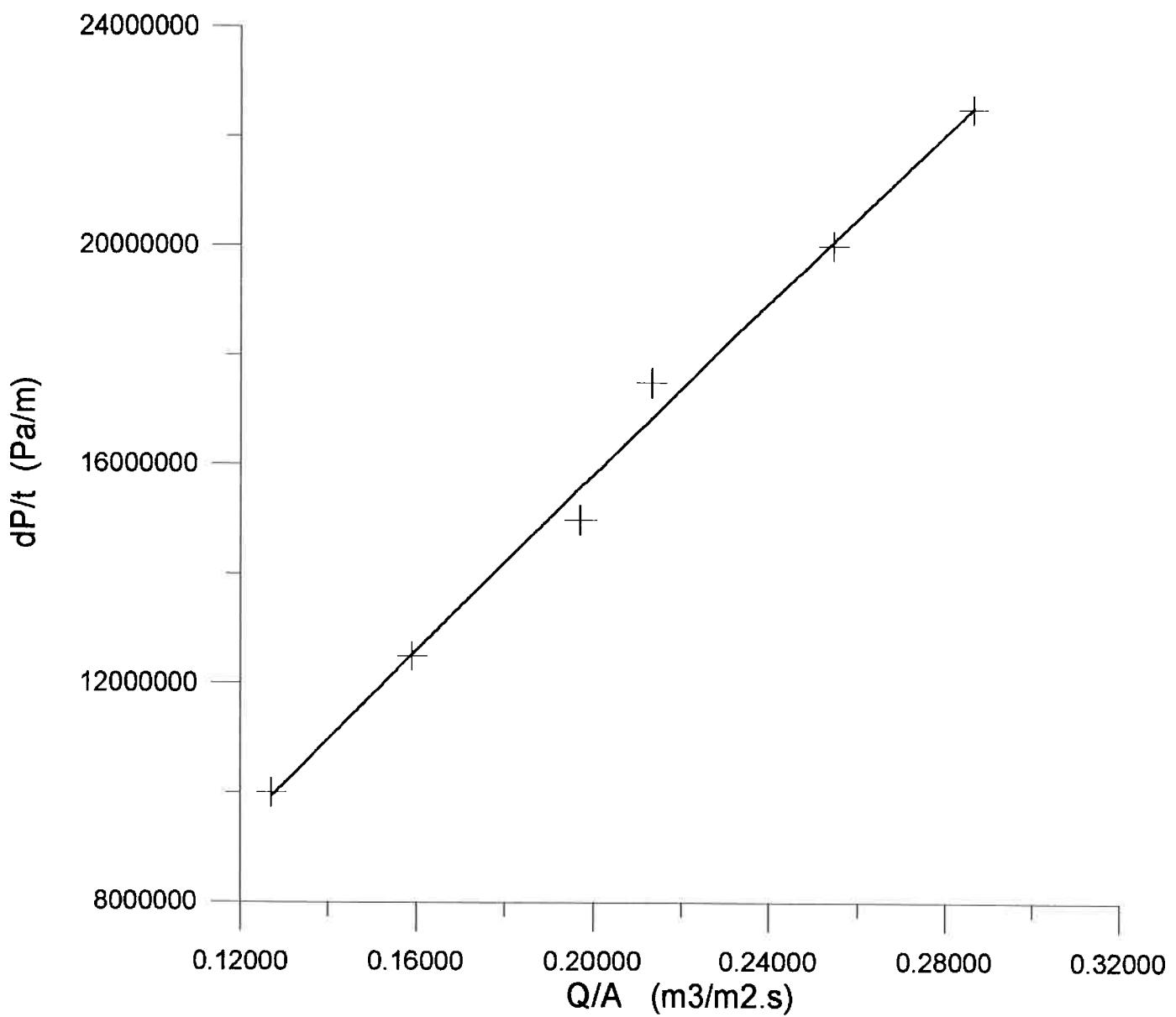
B2



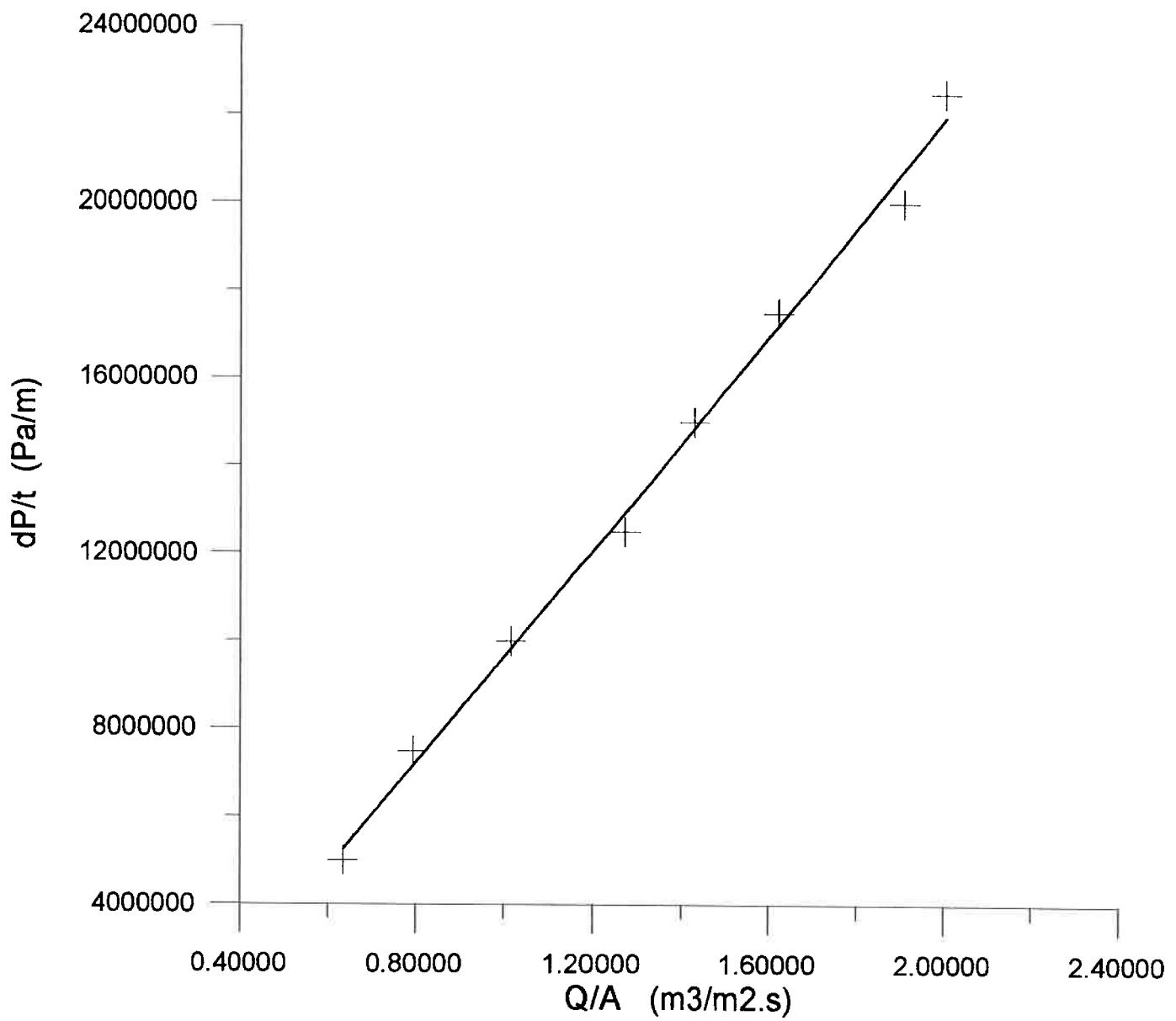
B3



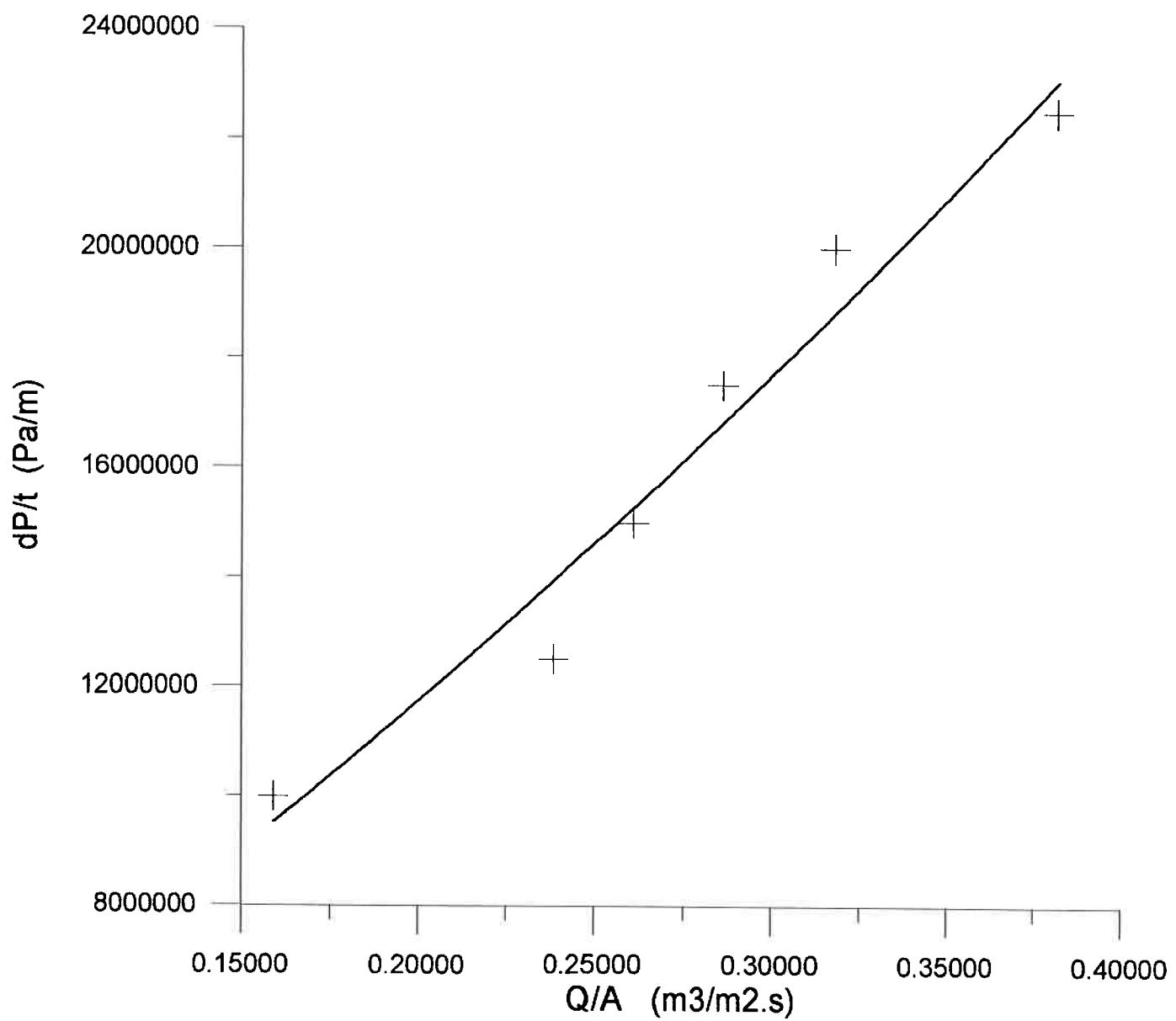
B4



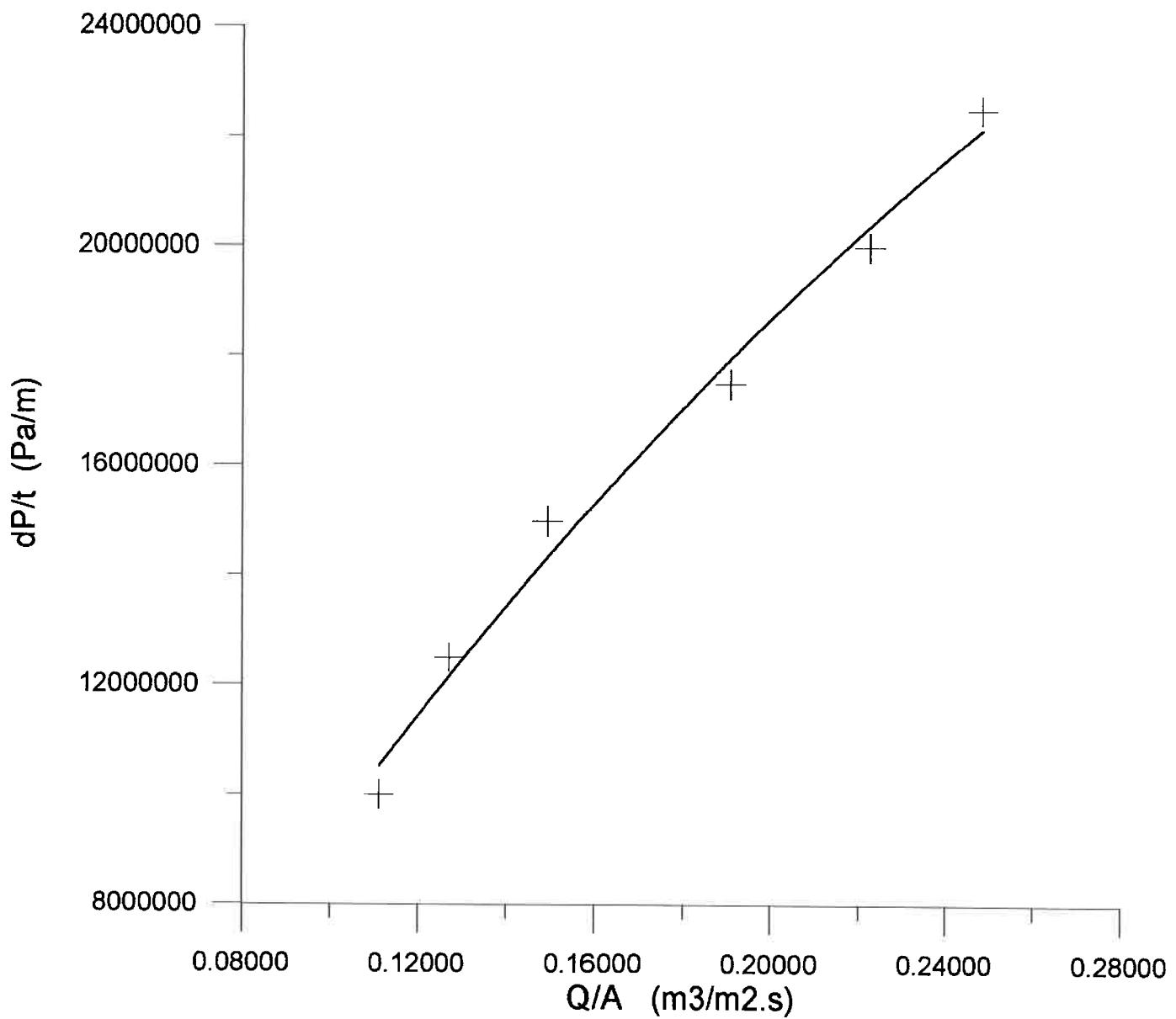
C0



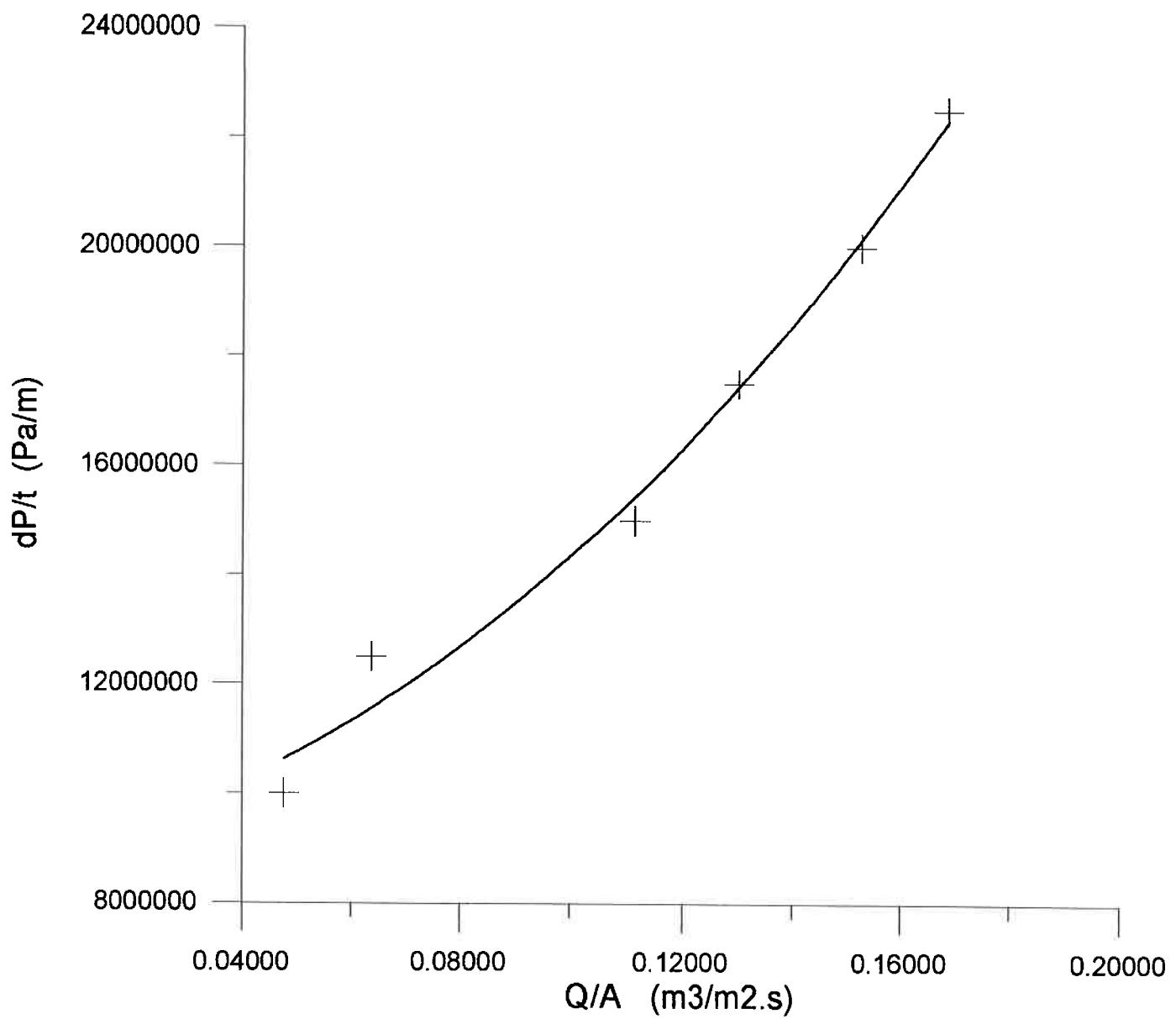
C2



C3



C4



9. Anexo II

<i>_tipo de pó</i>	<i>Pressão de compactação (MPa)</i>	<i>Coeficiente de correlação</i>
A	zero	0,990762
	200	0,992797
	300	0,994676
	400	0,993003
B	zero	0,9753363
	200	0,988963
	300	0,992281
	400	0,992841
C	zero	0,994783
	200	0,958463
	300	0,987737
	400	0,985849

Tabela IV - Coeficientes de correlação para as curvas de aproximação

10. Bibliografia

- 1- SCHEIDEGGER, E.A. Porous media. In: SCHEIDEGGER, E.A. The physics of flow through porous media. 3. ed. Toronto, University of Toronto Press, 1973. p. 5-29.
- 2- UNDERWOOD, E.E. Quantitative Stereology. Addison-Wesley, 1970. p. 1-47.
- 3- GEIGER, G.H. & POIRIER, G.H. Transport Phenomena in Metallurgy. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1972. p. 91-100.
- 4- GERMAN, R.M. Gas flow physics in porous metals. International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology. 1979. v. 15, p. 23-30.
- 5- HOFFMAN, G.; KAPOOR, D. Properties of Stainless Steels P/M Filters. International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology. 1976. v. 12, p. 281-96.
- 6- SMITH, D.W.; BROW, E.A.; SMURGERESKY, J.E.; McCABE, T.J. Characterization of controlled density P/M structures for filtration applications. Prog. Powder Metallurgy. 1985. v. 41, p. 653-67.

- 7- SMURGERESKY, J.E. & SMITH, D.W. Prediction of Gas Permeation from Microstructures of Controlled - Density Sintered Media.
Modern Developments in Powder Metallurgy. 1984.
v. 15, p. 335-50.
- 8- KAMINSKII, Ya. A. The motion of gases and liquids in porous sintered materials.
Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1965.
v. 8, p. 649-54.
- 9- GENTILE, E.F.; RAMOS JR, J. O.; KANADA, K.; TAKANO, C. Permeabilidade de bronze sinterizado para filtros.
Metalurgia - ABM. 1980.
v. 36, n. 273, p. 501-05.
- 10- LEITÃO JR., C.B.; ZORZETTO, L.F.
Estudo e desenvolvimento de um sistema para determinação da permeabilidade de placas porosas.
Publicação IPEN n. 257. 1989.
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
Departamento de Projeto do Combustível Nuclear.
São Paulo.
- 11- MORGAN, V.T. Filter Elements.
In: THE IRON AND STEEL INSTITUTE.
Powder Metallurgy Symposium. 1956.
p. 81-89.
- 12- ZAPATA, C.W. Estado atual da Metalurgia do Pó.
Metalurgia - ABM. 1987.
v. 43, n. 361, p. 880-90.

13- LAVOS, I.C. Preparação e Caracterização do filtro metálico de monel. 1993.

(Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre.)
Instistuto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

