

UM MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO DE QUEDA  
DO ELEMENTO DE CONTROLE PARA REATORES DO TIPO PWR

Carlos Eduardo Trindade  
João Roberto Loureiro de Mattos  
José Augusto Perrotta

Engenharia do Núcleo  
Departamento de Tecnologia de Reatores  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear-SP

SUMÁRIO

Foi desenvolvido um método para a determinação do sistema de amortecimento de queda do elemento de controle (tubo amortecedor/tubo guia). É apresentado um modelo teórico, uma montagem experimental e os procedimentos para a caracterização desse sistema, utilizado em reatores do tipo PWR.

ABSTRACT

A method to determine the Control Assembly dampening drop system (dashpot / guide tube) was developed. It's presented a theoretical model, an experimental device and the procedures to determine this sistem, which is used in PWR reactors.

## 1. INTRODUÇÃO

Em situações acidentais ou de desligamento do reator, o elemento de controle é liberado do seu mecanismo de acionamento, inserindo-se rapidamente no elemento combustível.

Para que a sua velocidade final de impacto, no topo do elemento combustível, não ultrapasse valores permitidos por projeto, é necessário um sistema de amortecimento. Este sistema consiste basicamente, de um tubo de menor diâmetro, colocado na extremidade inferior do tubo guia, de forma a prover um amortecimento hidráulico. Além deste tubo, existem furos do tubo guia, que permitem a refrigeração da vareta de controle, na condição de inserção, e servem de calibradores da velocidade de queda do elemento de controle.

Para caracterização deste sistema, desenvolveu-se um procedimento de seleção, que consta de um modelo teórico e de uma montagem experimental, descritos a seguir.

## 2. MODELO TEÓRICO

A equação de movimento é dada por:

$$(M + m) \cdot \frac{dv}{dt} = P - E - A - V \quad (1)$$

onde: M ... massa da vareta

m ... massa virtual da vareta devido à aceleração do fluido

v ... velocidade da vareta

P ... peso da vareta

E ... empuxo

A ... força de arraste nas varetas

V ... força de atrito viscoso entre a vareta e a água circundante.

Assumindo-se que todas as forças hidráulicas (força de arraste na vareta, atrito viscoso, etc) são proporcionais ao quadrado da velocidade da vareta, a equação (1) pode ser reescrita sob a forma:

$$\frac{dv}{dt} = C_1 - C_2 v^2 \quad (2)$$

a solução desta equação é:

$$v^2 = \frac{C_1}{C_2} (1 - e^{-2 C_2 z}) \quad (3)$$

com z sendo a distância percorrida pela vareta dentro do tubo guia.

Quando a vareta atinge o tubo amortecedor, deve haver um aumento na componente do atrito, pois tem-se um pequeno espaço entre a vareta e o tubo guia. Desta forma, a força de atrito será composta por dois termos: um referente a parte da vareta que está inserida no tubo amortecedor e outro termo relativo a

parte da vareta que está acima do tubo amortecedor. A equação (2) deve ser modificada, resultando:

$$\frac{dv}{dt} = C_1 - C_2 v^2 - C_3 z' v^2, \quad (4)$$

onde  $z'$  é a distância que a vareta percorre dentro do tubo amortecedor. A solução desta equação é:

$$v^2 = v_0^2 \exp(-2C_2 z' - C_3 z'^2) + 2C_1 \exp(-2C_2 z' - C_3 z'^2) \int_0^{z'} \exp(2C_2 z + C_3 z^2) dz, \quad (5)$$

com  $v_0$  sendo a velocidade de inserção no tubo amortecedor (calculada através da equação (3)).

A equação (5) só pode ser resolvida através de métodos numéricos, sendo que ela fornece a velocidade da vareta em qualquer ponto dentro do tubo amortecedor.

Este modelo teórico é simplificado, pois não mostra explicitamente a influência da furação do tubo guia e do tampão inferior, na velocidade de queda da vareta. Sendo estes parâmetros, dependentes do detalhamento mecânico de cada projeto.

Para se obter os coeficientes ( $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ ) das equações (2) e (4), são necessários experimentos.

### 3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Foi projetada e construída uma montagem experimental, operando em condições ambientais, que simula a queda do elemento de controle, através de uma única vareta (Figura 1). Os critérios básicos dessa bancada são:

- dimensões do modelo iguais às dimensões reais;
- fração em massa dos elementos que atuam na queda, reproduzida de forma proporcional no modelo experimental (massa do elemento de controle/ $n^2$  de varetas);
- diferenças operacionais de pressão e temperatura, corrigidas pela relação entre densidades.

O sistema de medição, consiste de um faiscador, que marca pontos em uma fita termosensível, em intervalos constantes de 1/60 segundos, durante o percurso da vareta.

As fitas obtidas reproduzem a curva espaço x tempo da queda da vareta, podendo-se avaliar o tempo total de queda e a velocidade final de impacto, bem como a influência do detalhamento mecânico (dimensões do tubo e furação) sobre estes parâmetros.

### 4. RESULTADOS DAS MEDIDAS

Para cada experimento são feitas várias repetições de medidas para se ter uma boa base estatística. A Figura 2 exemplifica os pontos obtidos experimental

mente, para uma dada configuração geométrica, do espaço percorrido x tempo de queda. São colocados na figura os pontos correspondentes aos valores calculados da velocidade e aceleração e as curvas ajustadas segundo as equações (3) e (5).

## 5. PARAMETRIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

A fim de melhor entendimento do sistema de amortecimento, verificou-se experimentalmente a influência de algumas características (como massa da vareta, vazão de água, etc) na velocidade final de impacto da vareta. Sendo assim, observou-se que um aumento de 1% no valor da vazão acarreta uma redução de 0,06% na velocidade final de impacto da vareta; já para a massa da vareta, verificou-se que a cada 1% de aumento tem-se um aumento na velocidade final correspondente a 0,51%. Notou-se ainda, um aumento de 0,13% na velocidade final de impacto da vareta para um acréscimo de 1% na área de passagem de água da furação feita no tubo guia (furos com o mesmo diâmetro).

## 6. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

Determinar o sistema de amortecimento tubo amortecedor/tubo guia, significa definir a altura e o diâmetro do tubo amortecedor; o diâmetro do furo do tampão inferior de fechamento do tubo guia e o número, diâmetro e posição dos furos do tubo guia.

A partir dos resultados da montagem experimental e do detalhamento mecânico do elemento combustível, define-se as alturas máxima e mínima possíveis do tubo amortecedor. Estas alturas, delimitam a região de seleção do sistema amortecedor (ver Figura 3).

O diâmetro do furo do tampão inferior, não deve produzir aceleração adicional na queda do elemento de controle e ser de fácil fabricação. Para os testes realizados utilizou-se um diâmetro de 1,0 mm.

Os furos do tubo guia devem ter uma área comparável à estabelecida pelo diâmetro externo da vareta absorvedora e diâmetro interno do tubo guia, na condição de inserção, sendo o diâmetro e número desses furos escolhidos de forma a não comprometer a resistência mecânica do tubo guia.

A velocidade máxima permitida no experimento deve ser a velocidade máxima de impacto estabelecida por projeto, pois o elemento de controle possui uma mola helicoidal, projetada para absorver uma energia específica de impacto. Para os reatores do tipo PWR, a velocidade máxima permitida é da ordem de 1,0 m/s, sendo este o principal critério para a determinação do sistema de amortecimento.

Como a montagem experimental opera a pressão e temperatura ambiente, os resultados devem ser corrigidos para as condições operacionais. Esta correção é feita pelas densidades, sendo que o valor de velocidade máxima perseguido no experimento vale:

$$V_{exp} = V_{proj} \cdot F_1 \cdot F_2 \quad (6)$$

onde  $V_{exp}$  ... velocidade buscada no experimento,

- Vproj ... velocidade máxima de impacto permitida,  
F<sub>1</sub> ... fator de correção devido às diferenças de densidade,  
F<sub>2</sub> ... margem para ajustes

Como pode ser visto na Figura 3, o encontro da linha traçada a partir de Vexp, com a linha de altura do tubo amortecedor, estabelece o diâmetro interno deste tubo.

Desta forma, a região de seleção do sistema de amortecimento fica compreendida entre as linhas de altura máxima e mínima do tubo amortecedor com a inserção da linha de Vexp máximo (figura 3). Nesta região, conforme a conveniência de fabricação e montagem, pode-se escolher as alturas e diâmetros do tubo amortecedor.

## 7. CONCLUSÕES

O modelo teórico apresentado é útil para a compreensão do problema e para o conhecimento dos fatores que têm influência na queda do elemento de controle. Todavia, não é suficiente para um detalhamento de projeto, pois alguns parâmetros influentes acham-se embutidos nas constantes, não podendo ser explicitados separadamente.

Sendo assim, para a definição desse sistema é necessário realizar um programa de experimentos, com equipamentos e procedimentos, semelhantes aos descritos anteriormente.

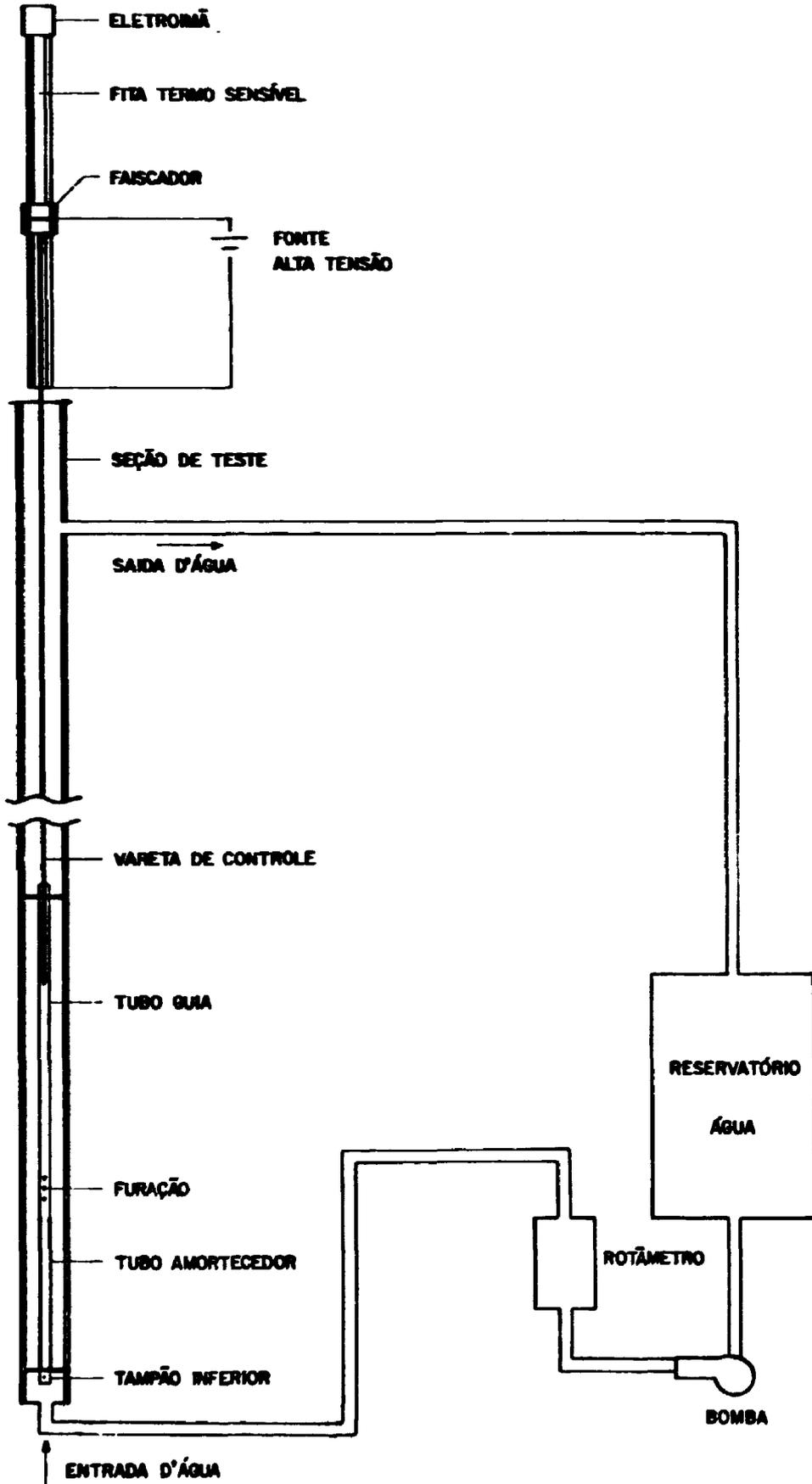
Outros aspectos observados, que servem como orientação na definição desse sistema, são:

- O furo do tampão inferior do tubo guia, não se destina a proporcionar uma vazão exata para o resfriamento da vareta de controle. Justifica-se no sentido de garantir a circulação de refrigerante na porção do tubo amortecedor, evitando uma região de possível estagnação e formação de um fluxo bi-fásico;
- Os furos do tubo guia calibram a velocidade de inserção da vareta no tubo amortecedor, ou seja, para diferentes diâmetros de tubo amortecedor a velocidade de inserção da vareta é constante, o mesmo não ocorrendo com o tubo guia sem furação;
- Dentro de uma faixa de velocidades de inserção da vareta no tubo amortecedor, a velocidade de impacto permanece constante (mantendo o furo do tampão do tubo guia constante). Acima de um determinado valor, na medida em que a vareta penetra com maior velocidade, nota-se um aumento da velocidade de impacto. Este valor de transição, para os sistemas estudados, está em torno de 3,0 m/s.

## 8. REFERÊNCIAS

- /1/ TONG, L.S. ; WEISMAN, J. - Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors
- /2/ DONIS, J. M. ; GOLLER, H - A Mathematical Model of a Control Rod drop  
Nuclear Engineering and Design 23 (1972) - North-Holland Publishing Company.

FIGURA 1 - MONTAGEM EXPERIMENTAL



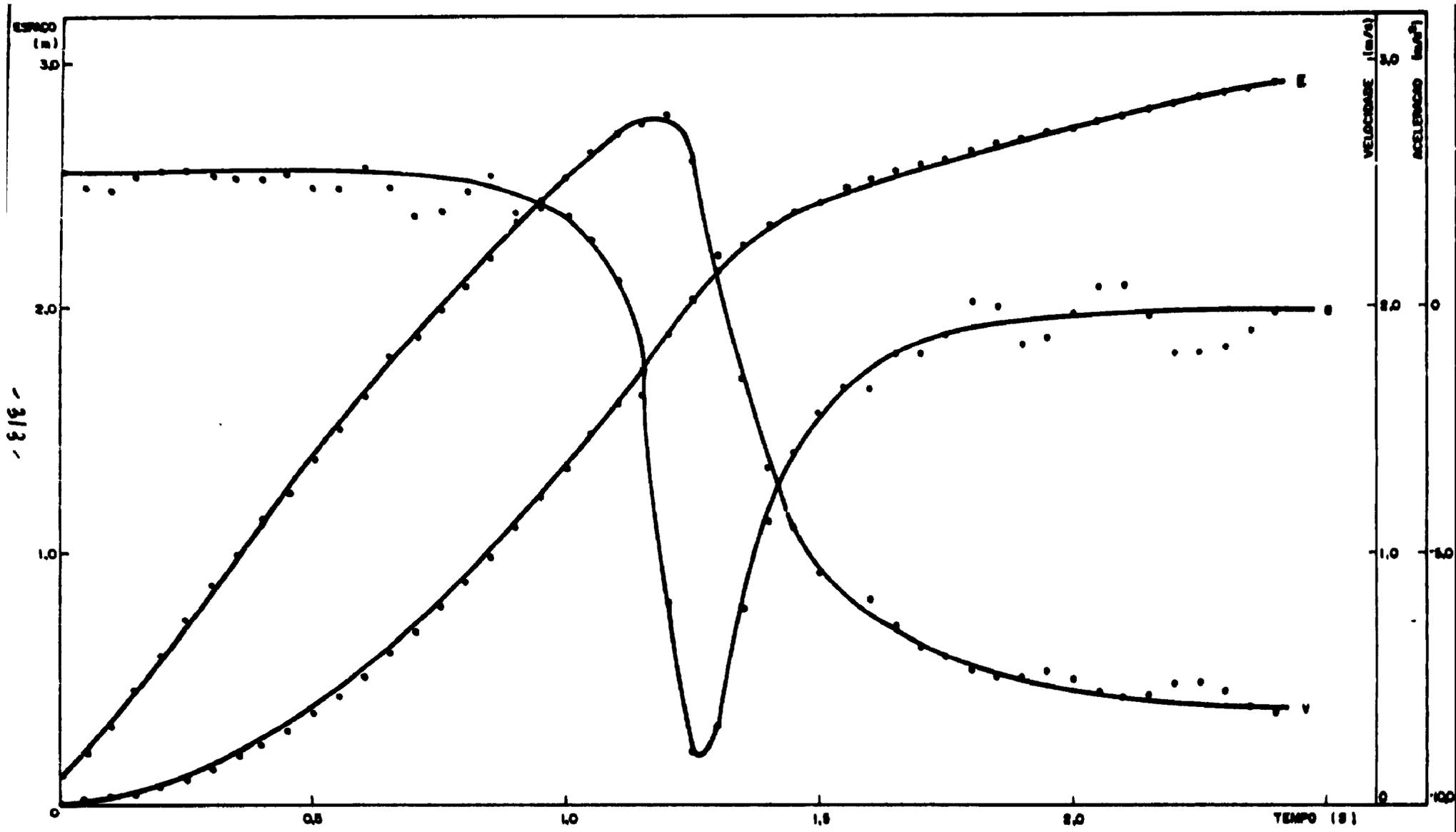


FIGURA 2 - CURVAS DE ESPAÇO, VELOCIDADE E ACELERAÇÃO DA VARETA EM FUNÇÃO DO TEMPO.

- 3/3 -

111

OBS: VELOCIDADE DE INSERÇÃO DA VARETA  
 NO TUBO AMORTECEDOR - 3,0 m/s

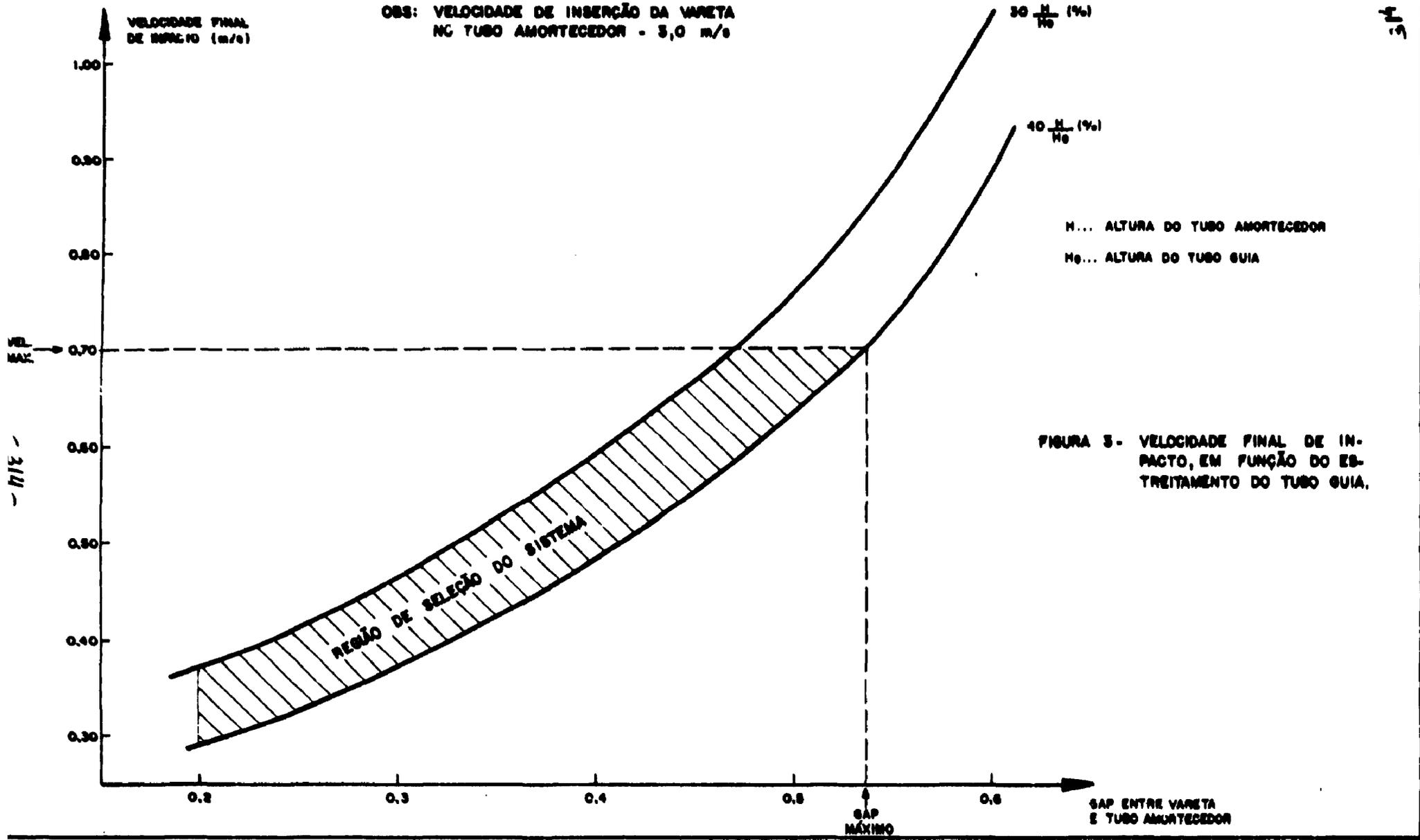


FIGURA 3- VELOCIDADE FINAL DE IMPACTO, EM FUNÇÃO DO ESTRUTURAMENTO DO TUBO GUIA.

34