2
AMORTECEDOR MAGNETOREOLÓGICO.

2.1.
AMORTECEDOR MAGNETOREOLÓGICO (MR)

Amortecedores magnetoreológicos (MR) têm recebido considerável atenção nos últimos anos já que oferecem a capacidade de adaptação significativa dos sistemas de controle ativos sem requererem grande consumo de energia e são também confiáveis como sistemas passivos. Outras características importantes incluem resposta rápida, à prova de falhas, interfaces simples entre controles eletrônicos e sistemas mecânicos, capacidade de uma grande força e robustez, facilidade de fabricação, em virtude de simplicidade mecânica, e confiabilidade. Isto o torna muito atrativo para a supressão de vibrações em muitas aplicações, sobretudo na engenharia civil, aeroespacial e automotora. Em particular, amortecedores magnetoreológicos (MR) têm se mostrado uma opção viável para a proteção de sistemas estruturais sob o efeito de sismo, quer como mecanismo de dissipação de energia no interior da estrutura quer como isoladores de base.

2.1.1.
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AMORTECEDOR MR

Um fluido magnetoreológico (MR) é um fluido capaz de mudar suas propriedades reológicas quando submetido a um campo magnético. Trata-se de soluções coloidais formadas por partículas polarizáveis ou magnetizáveis misturadas com um óleo inerte, geralmente a base de mineral ou de silicone (Torstem et al., 1999; Carlson, 2001; Milecki, 2001; Oh e Onada, 2002). Podes ser acrescentados aditivos para evitar a aglomeração e a precipitação das partículas. Quando um fluido magnetoreológico é submetido a um campo magnético, suas partículas começam a formar cadeias orientadas na direção do campo. Quanto mais forte o campo, maior será o número de partículas a formar estas cadeias, até que ocorra saturação. Quando é exercida uma força sobre o fluido e este tende a escoar, estas partículas dificultam o escoamento do fluido, alterando assim sua viscosidade aparente. O fluido MR foi desenvolvido por Rabinow e Winslow no fim da década de 40, sendo sua versão original tão eficiente quanto os atuais (Carlson, 2001).

2.2. DESCRIÇÃO GERAL DO AMORTECEDOR DE BOUC-WEN.

Muitos modelos foram propostos na literatura para descrever o comportamento dos amortecedores magnetoreológicos. Uma descrição dos principais modelos é encontrada no trabalho de Spencer et. al. (1996), que serviu de base para a maioria dos estudos posteriores nesta área. Dentre os modelos mencionados neste trabalho, o modelo de Bouc-Wen tem sido o mais usado na literatura. Este modelo é capaz de capturar, em forma analítica, uma gama de formas de ciclos de histereses que coincidem com o comportamento de uma série de sistemas físicos. Dada sua versatilidade e docilidade matemática, o modelo Bouc-Wen ganhou rapidamente grande popularidade e foi ampliado e aplicado a uma ampla variedade de problemas em engenharia, em particular para simular analiticamente o fenômeno da histerese presente no amortecedor MR e outros tipos de dispositivos de amortecimento. O modelo foi introduzido por Bouc (1967,1971) e ampliado por Wen, (1976).

2.3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO BOUC WEN.

Considere a equação de movimento de um só grau de liberdade dada por

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F\left(t\right) = f(t) \tag{2.1}$$

Onde, *m*, representa a massa, *x*, o deslocamento, c, o coeficiente de amortecimento viscoso linear, *F(t)*, a força de restauração e *f(t)* a força de excitação, enquanto o ponto representa a derivada com respeito ao tempo.

Considere que a força de restauração é dada por

$$F\left(t\right) = ak_i x + (1-a)k_i z \tag{2.2}$$

Onde, $a = \frac{k_f}{k_i}$, é o razão da rigidez elástica e plástica, sendo k_f a parcela plástica e ($k_i = \frac{F_y}{x_y}$) a rigidez elástica, onde F_y é a força que caracteriza o início da plastificação e x_y o deslocamento correspondente ao início da plastificação e z é um parâmetro adimensional associado ao ciclo de histerese que é definido a partir da equação diferencial:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z|^{n-1} z - \beta \dot{x} |z|^{n} + A\dot{x} \tag{2.3}$$

Onde $A, \beta > 0$, γ e n são quantidades adimensionais que controlam o comportamento do modelo, sendo A um fator de escala, β e γ parâmetros de forma e n um fator que regula a suavidade da transição entre a região linear e não linear (n=∞, recupera a histereses plástica). O efeito do parâmetro n sob a forma da curva da histerese foi descrita por Spencer et al. (1986). A força restauradora pode ser descomposta em duas parcelas; uma elástica e a outra devida à histerese, sendo dadas respectivamente por

$$F^{el}(t) = a k_i x \tag{2.4}$$

$$F^{h}(t) = (1-a) k_i z \tag{2.5}$$

Portanto pode-se modelar a força restauradora como um sistema de duas molas em paralelo.

2.3.1. MODELO BOUC-WEN APLICADO A UM AMORTECEDOR MR

O modelo de Bouc–Wen mostrado na Figura 2.1 é um dos modelos usados na literatura para caracterizar o fenômeno da histerese em amortecedores MR. Verifica-se através dos ensaios experimentais que a força total de amortecimento no modelo de Bouc-Wen pode ser representado matematicamente pela soma de três parcelas

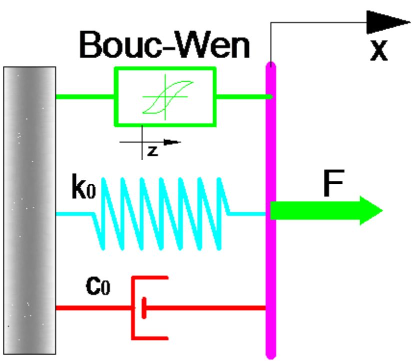

Figura 2.1 Representação simbólica do amortecedor com fluido MR segundo o modelo Bouc-Wen. Spencer *et al (1996)*

$$F = c_o\dot{x} + k_o x + \alpha z \tag{2.6}$$

As duas primeiras parcelas descrevem o amortecimento e a rigidez inerentes ao amortecedor MR, sendo em geral pequenas, e a terceira como mostrada no item anterior, descrevem a parte histerética, onde, z, é a variável evolutiva descrita pela eq.(2.3).

Uma das dificuldades práticas para o uso do modelo de Bouc-Wen é o grande número de parâmetros envolvidos na modelagem e a dificuldade em obtê-los. Ensaios experimentais feitos por Spencer, *et al.* (1996), mostram o comportamento do amortecedor MR mediante gráficos que relacionam força-deslocamento e força-velocidade. Uma técnica para a determinação dos parâmetros do modelo de Bouc-Wen a partir dos dados experimentais foi desenvolvida por Dominguez**,** *et al* (2004). Ela consiste em desacoplar as três curvas que representam: a viscosidade, a mola e o comportamento de histerese do modelo Bouc-Wen. Estas três parcelas são ilustradas na Figura 2.2. A linha reta é o efeito da viscosidade, a curva pontilhada, o efeito da mola devido à pressão do gás e a curva contínua, o efeito da histerese causado pela variável evolutiva dependendo do sinal de z e $\dot{x}$, eq.(2.6). Aqui se considerou n=2.

A Figura 2.3 apresenta a variação da relação força-velocidade para diversos valores de *n*. Conclui-se que, com o aumento do valor de n, o raio de curvatura decresce nas vizinhanças da transição dos pontos P1 e P3.

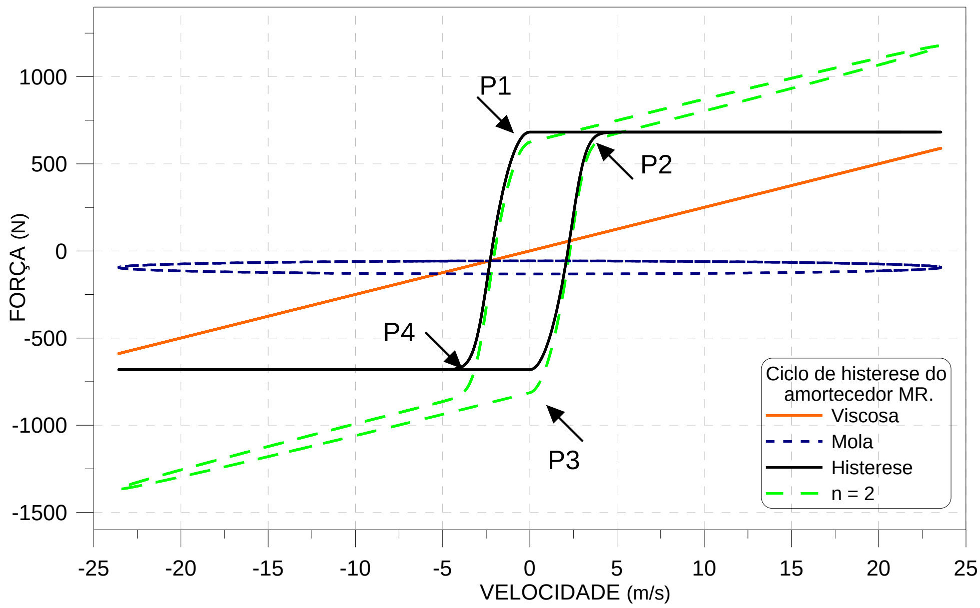

Figura 2.2 Parcelas presentes na formulação do amortecedor de Bouc-Wen.

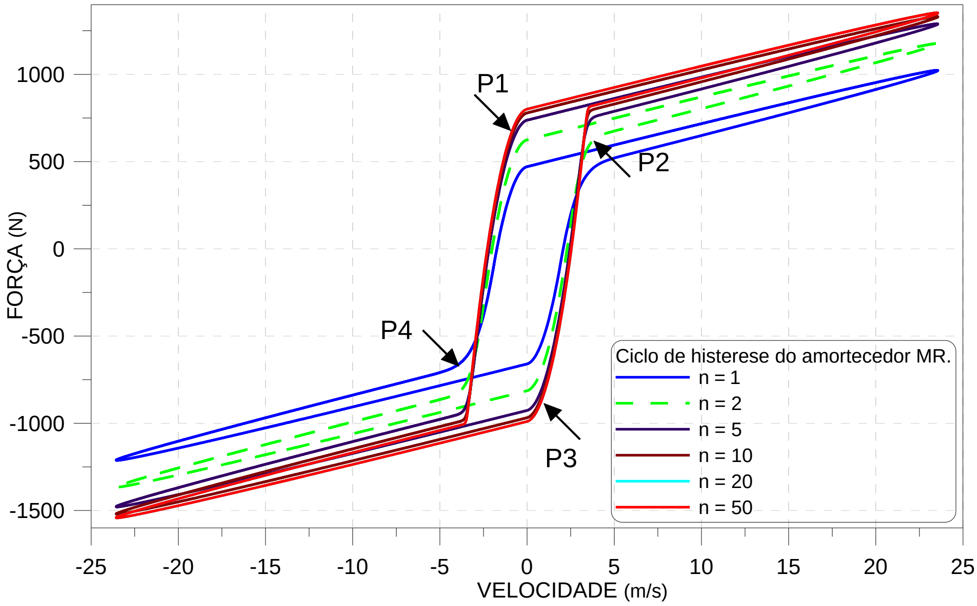

Figura 2.3 Influência do parâmetro *n* no ciclo de histerese do amortecedor MR.

Inicialmente, pode-se calcular o parâmetro característico de amortecimento c_0. A partir Figura 2.2 verifica-se que o amortecimento viscoso pode ser obtido a partir da declividade da linha central do ciclo de histerese no ponto onde se atinge a velocidade máxima. A partir dos dados experimentais, esta declividade pode ser calculada a partir da equação.

$$c_o = \frac{F_{ku} + F_{kl} - F_{iu} - F_{il}}{2(\dot{x}_k - \dot{x}_i)} \tag{2.7}$$

Aqui $\dot{x}_k$ *e* $\dot{x}_i$ representam a velocidade em dois pontos diferentes k e i na vizinhança da velocidade máxima, **F** representa a força obtida no experimento para estes dois pontos e os índices u e l referem-se à parte superior e inferior do ciclo de histerese. Em resumo, o fator de amortecimento é a declividade da linha central do ciclo de histereses no ponto de velocidade máxima.

O segundo termo da eq.(2.6) representa o efeito de mola devido à pressão do gás. Ciclos de histereses típicos para diferentes constantes da mola k_0 são mostrados na Figura 2.4.

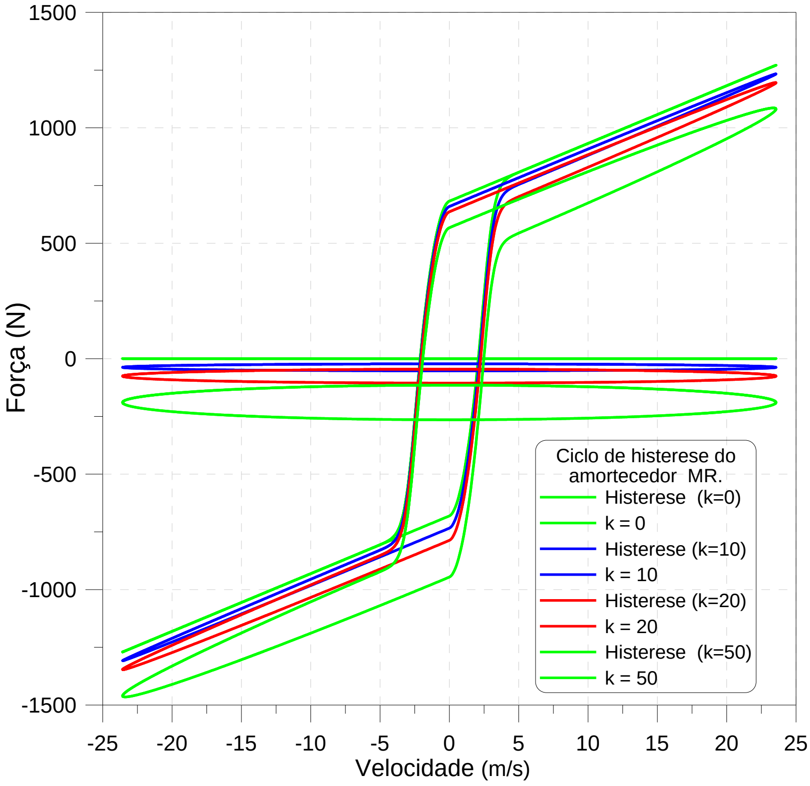

Figura 2.4 Efeito do parâmetro de rigidez Ko no comportamento de histerese do amortecedor MR.

Da Figura 2.4, observa-se que existe uma relação elíptica entre a força devida à mola e a velocidade, no caso de uma excitação harmônica. A partir desta observação, pode-se obter a constante k_o a partir da expressão:

$$k_0 = \frac{\dot{x}(F_{iu} - F_{i1})}{2\sqrt{(\dot{x}_{max}{}^2 x^2 - x^2 \dot{x}_k{}^2)}} \tag{2.8}$$

Onde $\dot{x}_{máx} = \omega x_{máx}$ é a máxima velocidade e $x_{máx}$, a magnitude do deslocamento da excitação.

O efeito do parâmetro β na curva típica de histerese é mostrado na Figura 2.5. Observa-se que, com o incremento do parâmetro β, o raio da curvatura (suavidade da curva) decresce na vizinhança dos pontos P1 e P3.

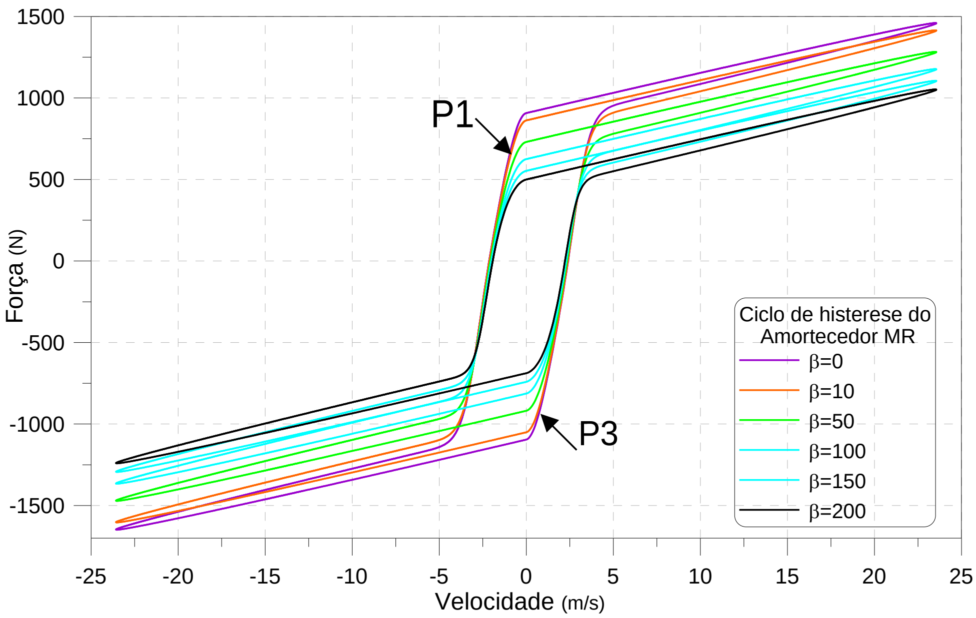

Figura 2.5 Efeito do parâmetro β no comportamento do amortecedor MR.

A partir da solução da equação diferencial (2.3), obtêm-se as expressões:

$$z = \frac{\sqrt{AB}}{B}\tanh(\sqrt{AB}\left(\dot{x} + c1\right) \quad \text{para}\left(\ z < 0, x < 0\right) \text{ ou } (z \geq 0, x < 0) \tag{2.9}$$

$$z = \frac{\sqrt{AB}}{B}\tanh(\sqrt{AB}(\dot{x} + c2) \quad \text{para}\left(\ z \geq 0, x \geq 0\right) \text{ ou } (z < 0, x \geq 0) \tag{2.10}$$

Que descrevem a variação de *z*, onde, c1 e c2 são as constantes de integração e B é igual a $-(\gamma + \beta)$ ou $-(\gamma - \beta)$. As diferentes combinações das constantes dos parâmetros A, γ e β, definem a amplitude da curva e a velocidade no ponto onde a variável evolutiva é zero.

Os pontos $(F_{z0}, \dot{x} = 0)$; e $(F_z = 0,\ \dot{x}_{z0})$, que são as forças evolutivas no ponto de velocidade zero e a velocidade no ponto onde a força evolutiva é zero, podem ser extraído do ciclo de histerese. Tendo em vista que a força evolutiva pode ser descrita por:

$$F_z = \alpha z \tag{2.11}$$

Onde *z* é a variável evolutiva, assumindo A=1 e substituindo a variável evolutiva z dada pela eq.(2.9) na eq. (2.11), a constante de integração pode ser determinada usando o ponto de coordenada $(F_{z0}\ , \dot{x} = 0)$:

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{\gamma}}\operatorname{atanh}\left(\frac{F_{z0}}{F_{zmáx}}\right) \tag{2.12}$$

Onde.

$$F_{zmáx} = \frac{\alpha}{\sqrt{\gamma}} \tag{2.13}$$

É a força evolutiva no ponto de máxima velocidade.

Deve-se notar que $F_{zmáx}$ pode ser calculado a partir dos dados experimentais mediante a seguinte equação:

$$F_{zmax} = F_{máx} - c_o \dot{x} \tag{2.14}$$

Onde $F_{máx}$ é a máxima força total de histerese.

Considerando as equações (2.9), (2.11) e (2.12) usando a coordenada no ponto $(F_z = 0, \dot{x}_{z0})$, o parâmetro γ pode ser determinado através da solução da seguinte equação:

$$0 = f_{zmáx} \tanh\left(\sqrt{\gamma}\left(\dot{x}_{z0} + \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \operatorname{atanh}\left(\frac{F_{z0}}{F_{zmáx}}\right)\right)\right) \tag{2.15}$$

Conhecendo o parâmetro γ, agora o parâmetro α pode ser determinado facilmente usando a eq. (2.13).

Finalmente, as constantes de integração são substituídas nas equações (2.9) e (2.10), para obter a variável evolutiva e, posteriormente, a força evolutiva.

Em resumo, os parâmetros característicos podem ser calculados usando as equações. (2.7), (2.8), (2.13) e (2.15) com base nos resultados experimentais.

2.4. ANÁLISE NUMÉRICA DO MODELO BOUC-WEN NO AMORTECEDOR MR

Aqui se usam os parâmetros obtidos a partir de ensaios experimentais feitos por Spencer, *et al* (1996), a saber

α = 880 N/cm2, co = 25 N*s/cm, ko:=25 N/cm, γ = 100 cm2, β = 100 cm2, n = 2, A = 120 e xo =3.8 cm.

Este amortecedor MR foi submetido durante os ensaios a uma força sinusoidal com uma amplitude de 1.5 cm e uma frequência de 2.5 Hz.

Resolvendo as equações diferenciais (2.3), (2.6) e a função de amplitude do deslocamento do amortecedor pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem no programa MAPLE, se obtêm os resultados apresentados nas Figura 2.6 a Figura 2.9 que coincidem com os resultados experimentais apresentados por Spencer *et al (1996)*. Na Figura 2.9 apresentam-se as diversas parcelas que compõem a resposta do modelo de Bouc-Wen.

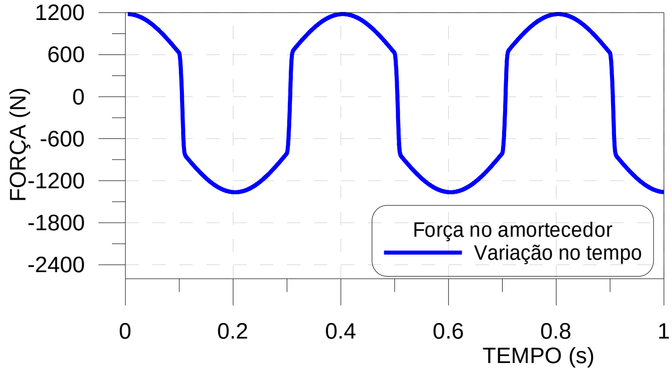

Figura 2.6 Variação da força (F) no amortecedor MR ao longo do tempo.

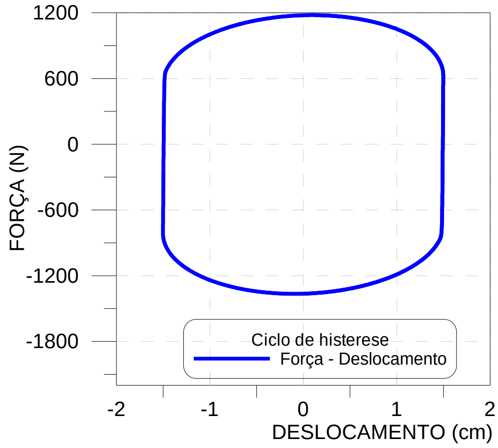

Figura 2.7 Força versus deslocamento

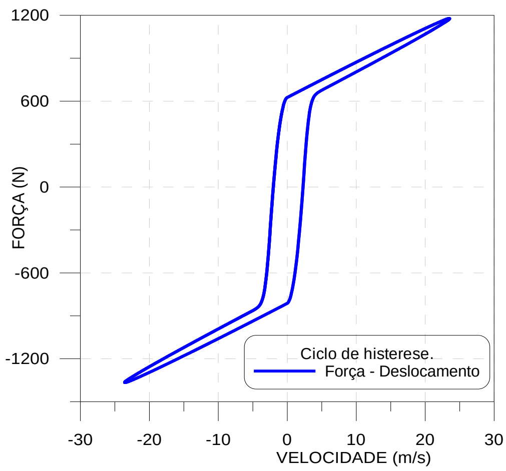

Figura 2.8 Força versus velocidade.

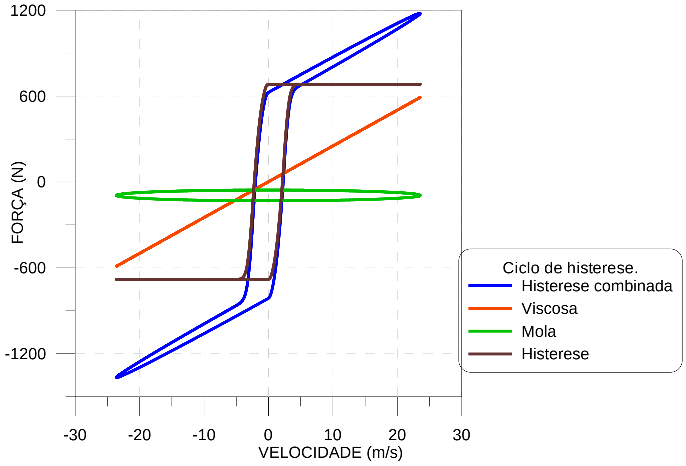

Figura 2.9 Decomposição das parcelas presentes no comportamento de histerese não linear no modelo de Bouc-Wen.