

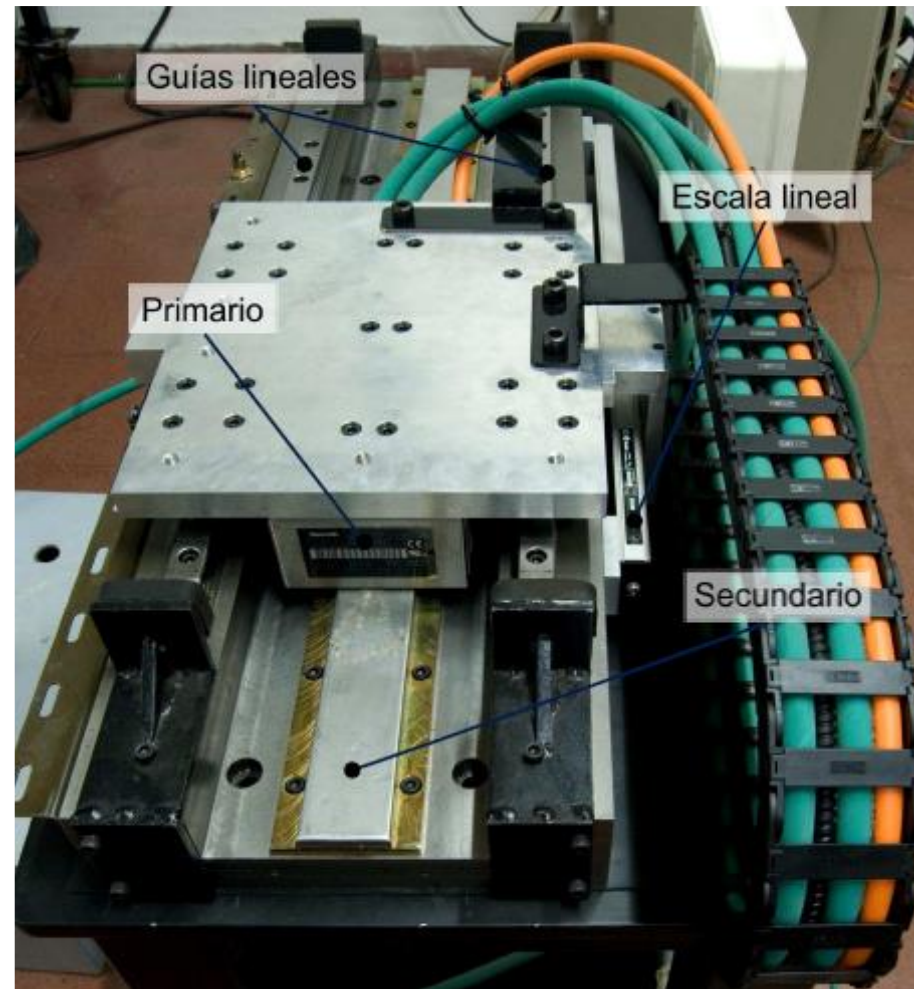
# **Modelo dinámico de fricción de superficies lubricadas**

**Rogelio Hecker**

**UNLPam-CONICET**

# Sistema en estudio

- Equipamiento
  - Motor lineal
  - Guías de bolas recirculantes
  - Escala lineal (100 *nm* de resolución)
- Propuesta
  - Lograr posicionamientos micrométricos
  - Aceleraciones y velocidades elevadas



# Problema

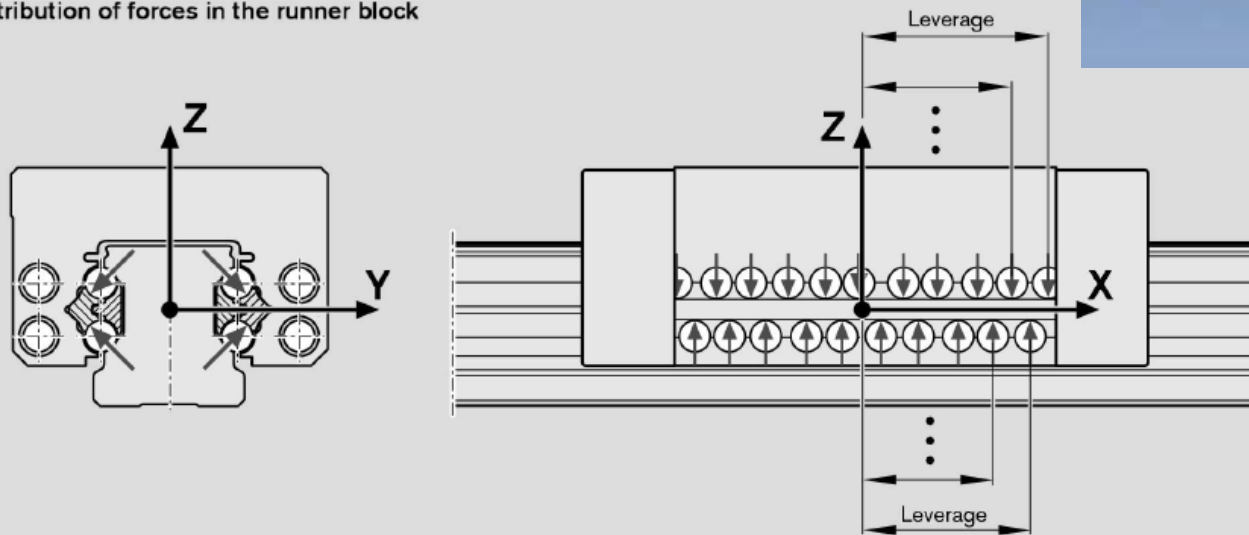
- Características del motor lineal
  - Alta velocidad de respuesta
  - Sin acoplamientos mecánicos por lo tanto sin modos de vibración
  - Muy sensible a perturbaciones externas
- Perturbaciones externas
  - Fuerzas externas (maquinado, etc.)
  - Fricción
    - Fenómeno complejo que degrada la precisión de posicionamientos

# Guías lineales

- Características
  - Elementos rodantes
  - Sellos
  - Precarga

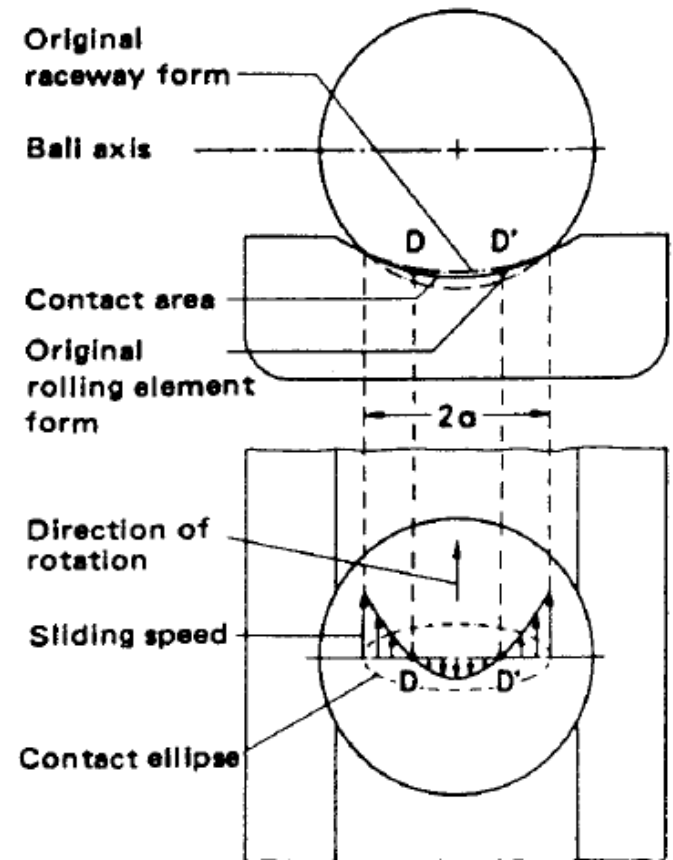


Distribution of forces in the runner block



# Efecto de la precarga

- Los elementos rodantes se deforman generando zonas de deslizamiento
- Los elementos rodantes deslizan respecto a las superficies de los canales y entre ellas (o separadores)

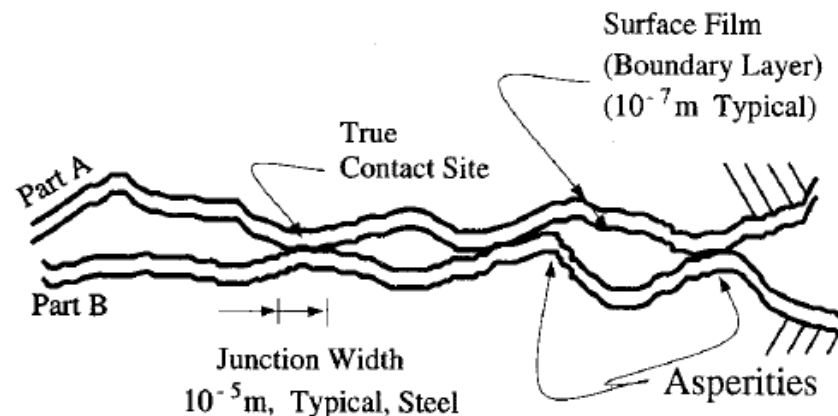
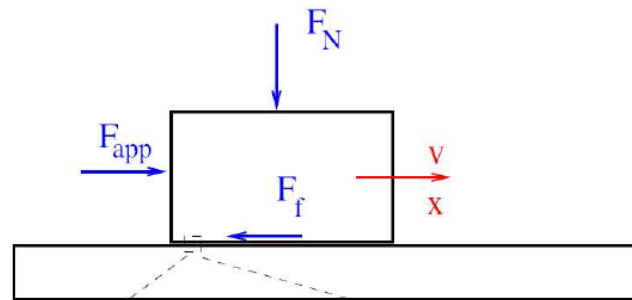


# Característica de la fricción en guías

- Por lo tanto
  - Los elementos rodantes generan fuerza de fricción de superficies deslizantes y lubricadas
  - Los sellos también generan fuerza de fricción de superficies deslizantes

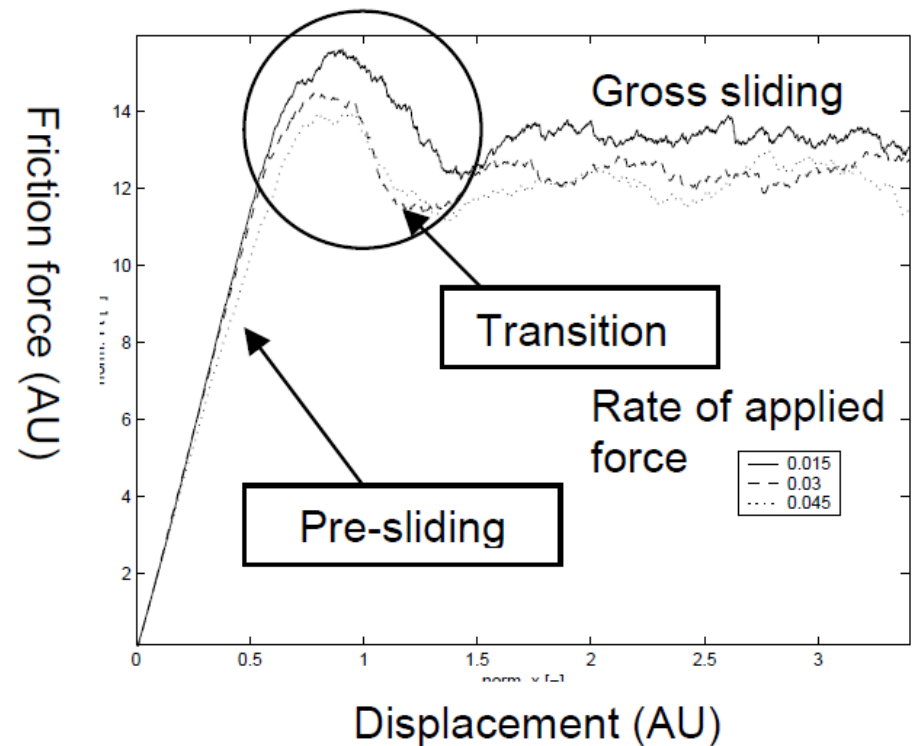
# Fricción de superficies deslizantes

- Fenómeno complejo dominado por las asperezas y la lubricación entre las superficies



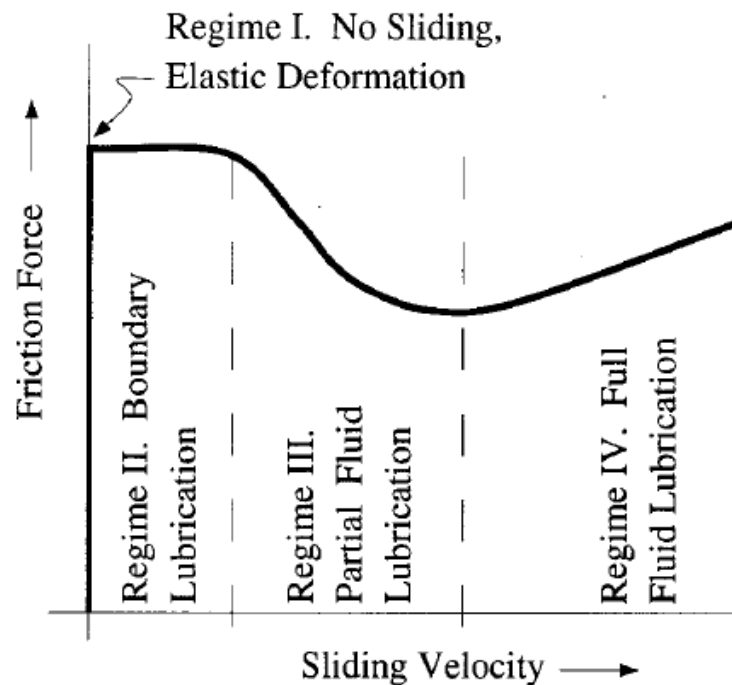
# Observaciones preliminares

- Dos regimenes bien marcados
  - Predeslizamiento
  - Deslizamiento



# Zona de deslizamiento

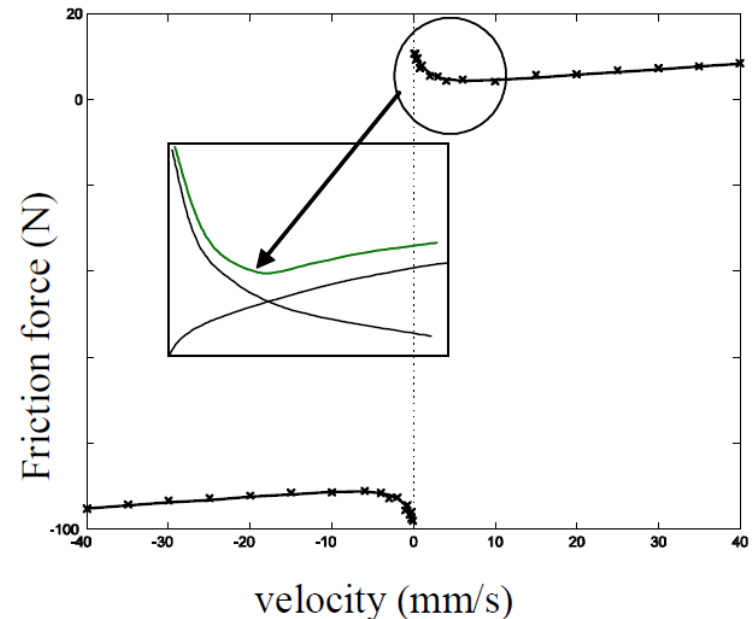
- Fricción vs velocidad constante
  - Se describen 4 Regimenes de la fuerza de fricción vs velocidad de deslizamiento



# Zona de deslizamiento

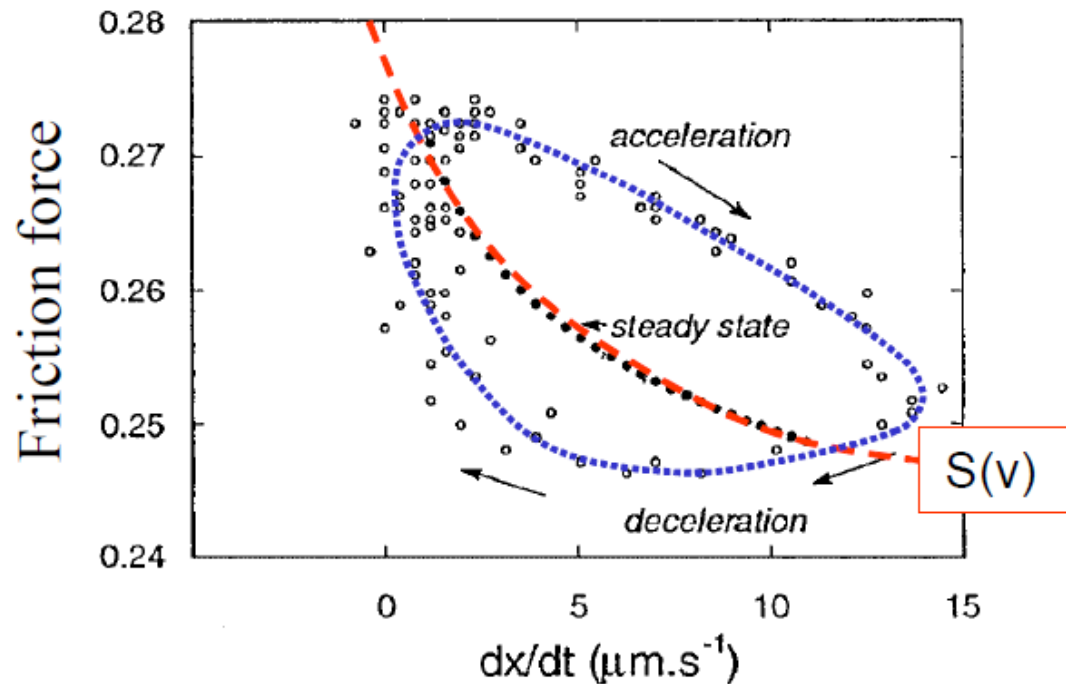
- Datos experimentales

- Valor inicial para velocidad cero
- Debilitamiento de la fuerza debido a la formación de la presión hidrodinámica (efecto Stribeck)
- Aumento de la fuerza debido a la fricción viscosa



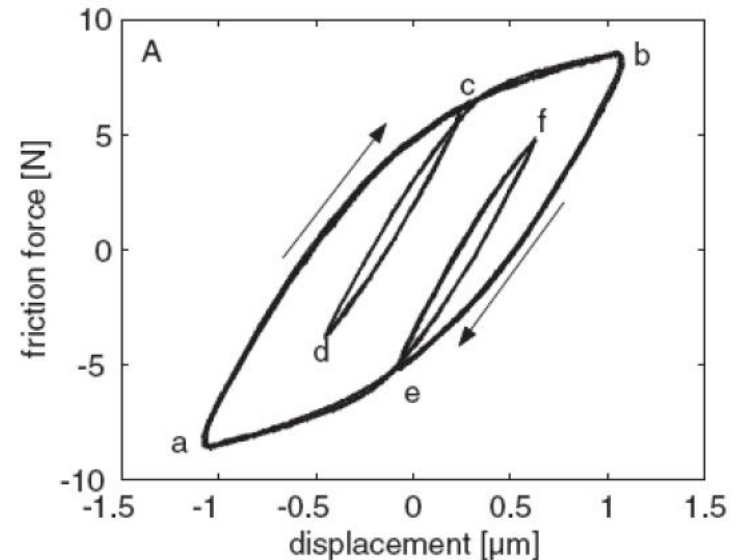
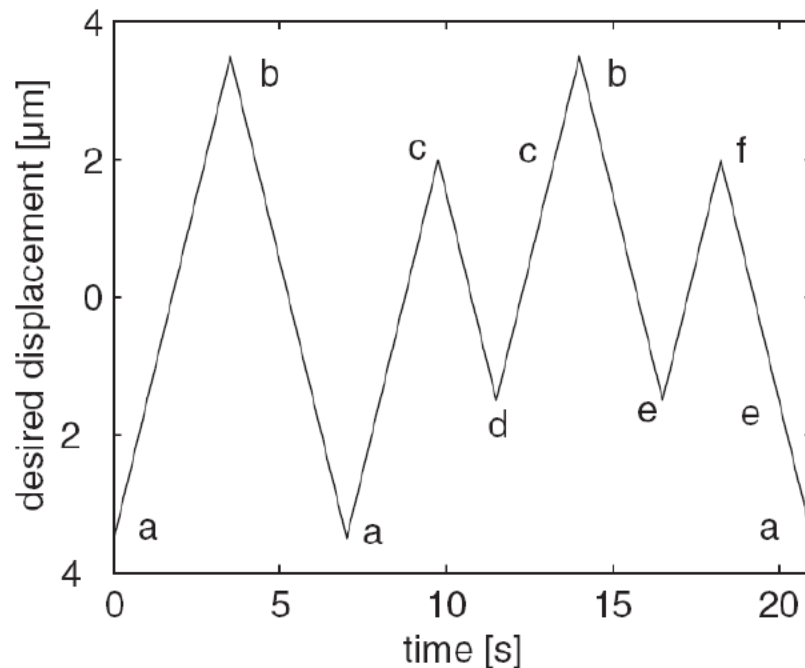
# Zona de deslizamiento

- Efecto de los cambios de velocidad
  - Efecto conocido como “friction lag”



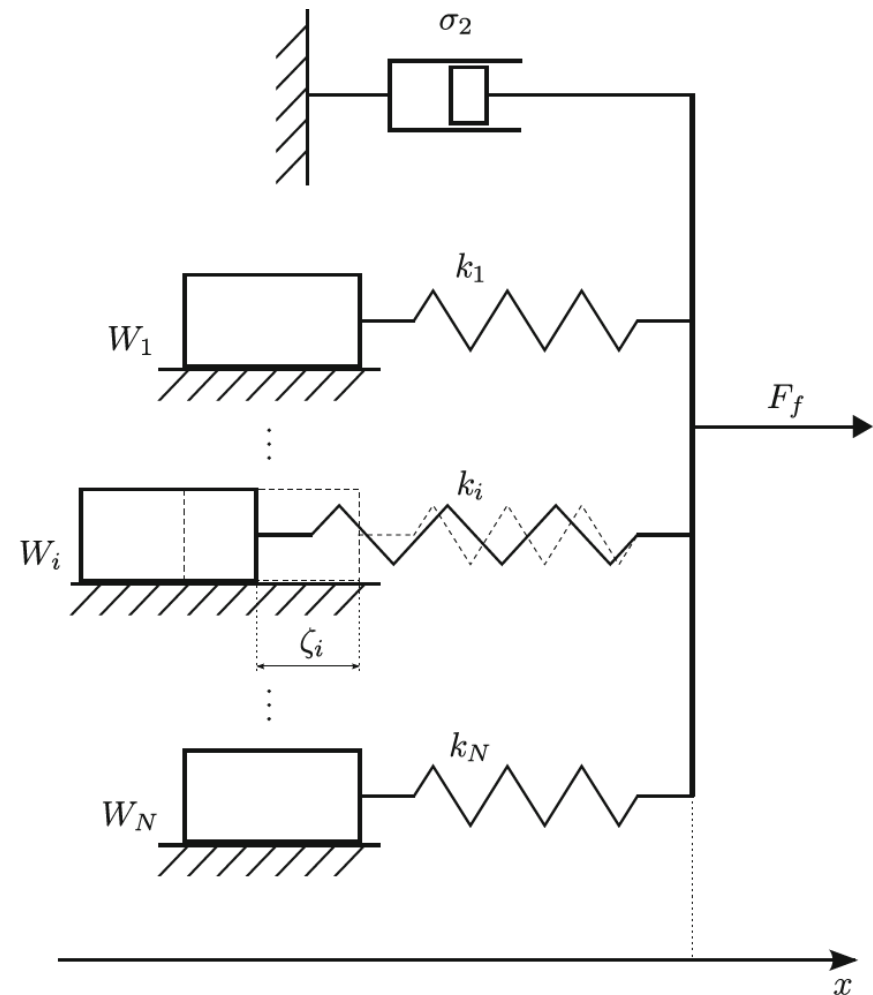
# Predeslizamiento

- La fuerza depende del desplazamiento (no de la velocidad !!!)
- Histéresis con memoria no local



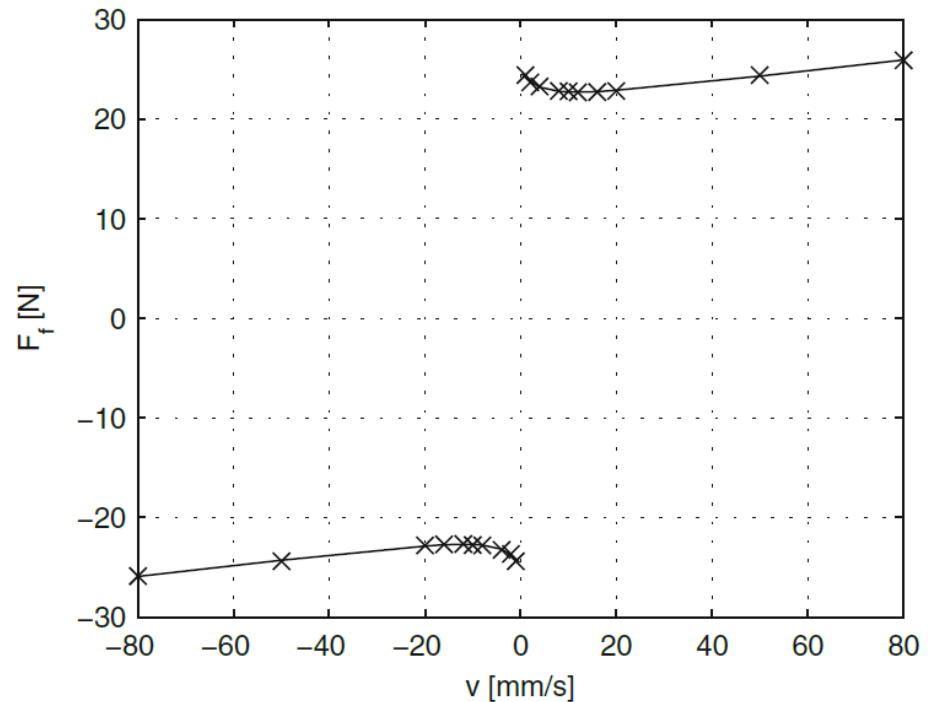
# Generalized Maxwell-Slip model (GMS)

- Principio básico
  - Grupo de elementos que representan a las asperezas
  - Con ecuaciones de la dinámica para cada zona
  - Conmutación de la dinámica determinada por los estados de cada elemento



# Curva de Stribeck

- Experimentación



- Parametrización posible

$$F_f(v) = \text{sgn}(v) \left( F_c + (F_s - F_c) e^{-\left| \frac{v}{V_s} \right|^{\delta V_s}} \right) + \sigma_2 v$$

# Curva de Stribeck

- Identificación de datos

$$s(v) = \text{sgn}(v) \left( F_c + (F_s - F_c) e^{-\left| \frac{v}{V_s} \right|^{\delta_{V_s}}} \right)$$

$F_s$ [N]	$F_c$ [N]	$V_s$ [ $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ ]	$\delta_{V_s}$	$\sigma_2$ [Ns/mm]
26.1	21.6	3.1	0.6	0.054

$F_c$  la fricción de Coulomb

$F_s$  la fricción estática

$V_s$  la velocidad de Stribeck

$\delta_{V_s}$  el factor de forma de Stribeck

# Ecuaciones del modelo GMS

- Fuerza total

$$F_f(t) = \sum_{i=1}^N F_i(t) + \sigma_2 v(t)$$

- Adherencia para cada elemento

$$\frac{dF_i}{dt} = k_i v$$

- Deslizamiento para cada elemento

$$\frac{dF_i}{dt} = \text{sgn}(v) v_i C \left( 1 - \frac{F_i}{v_i S(v)} \right)$$

# Predeslizamiento

- Dinámica de la fuerza por elemento

$$\frac{dF_i}{dt} = k_i v$$

- Transición entre adherencia y deslizamiento

- Condiciones  $F_i = v_i s(v)$

$$0 \leq v_i \leq 1 \quad \sum v_i = 1$$

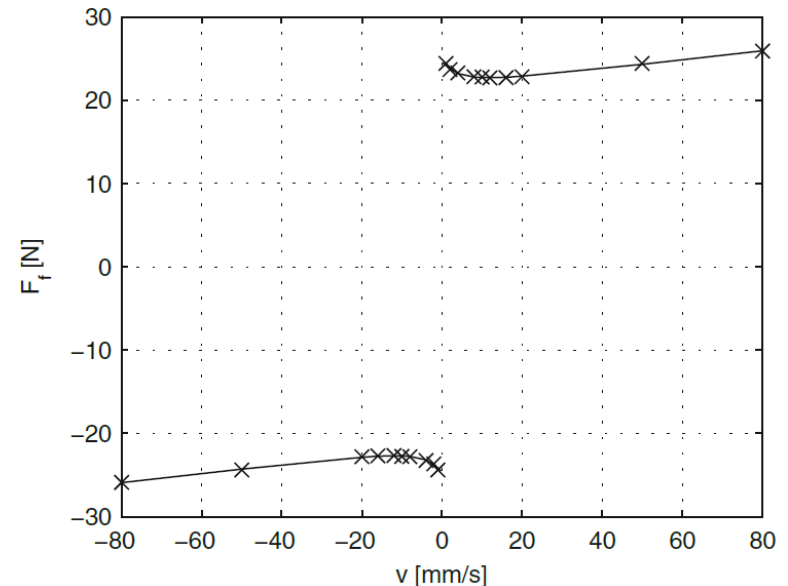
# Deslizamiento

- Dinámica de la fuerza de deslizamiento por elemento incluyendo el “friction lag”

$$\frac{dF_i}{dt} = \text{sgn}(v) v_i C \left( 1 - \frac{F_i}{v_i s(v)} \right)$$

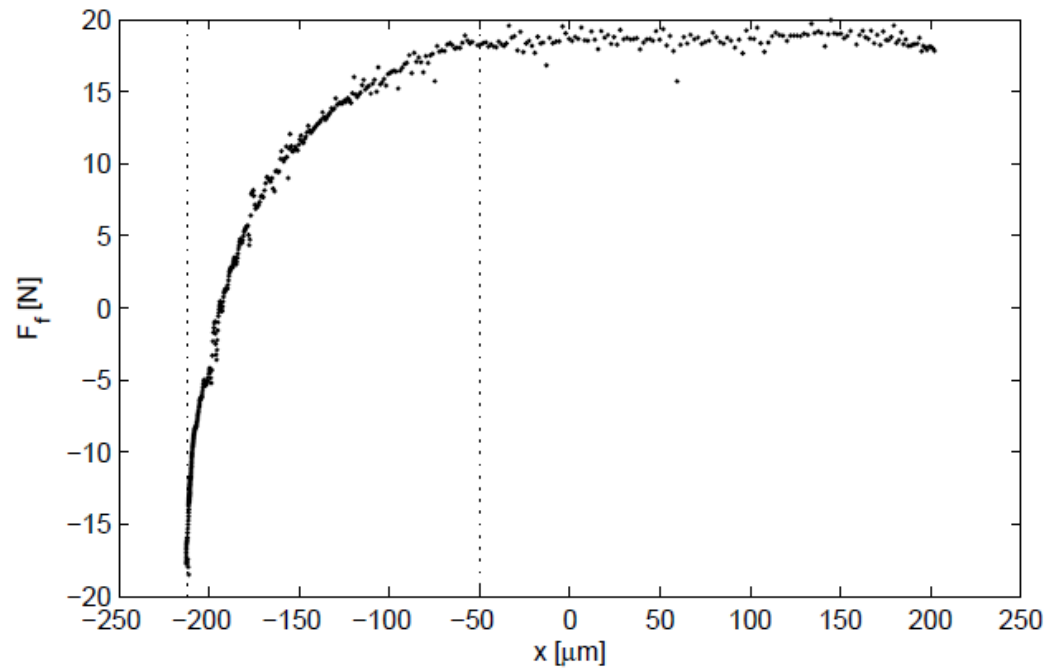
- Parámetro de atracción a la curva de Stribeck

$$C = 10.8 \text{N/s}$$



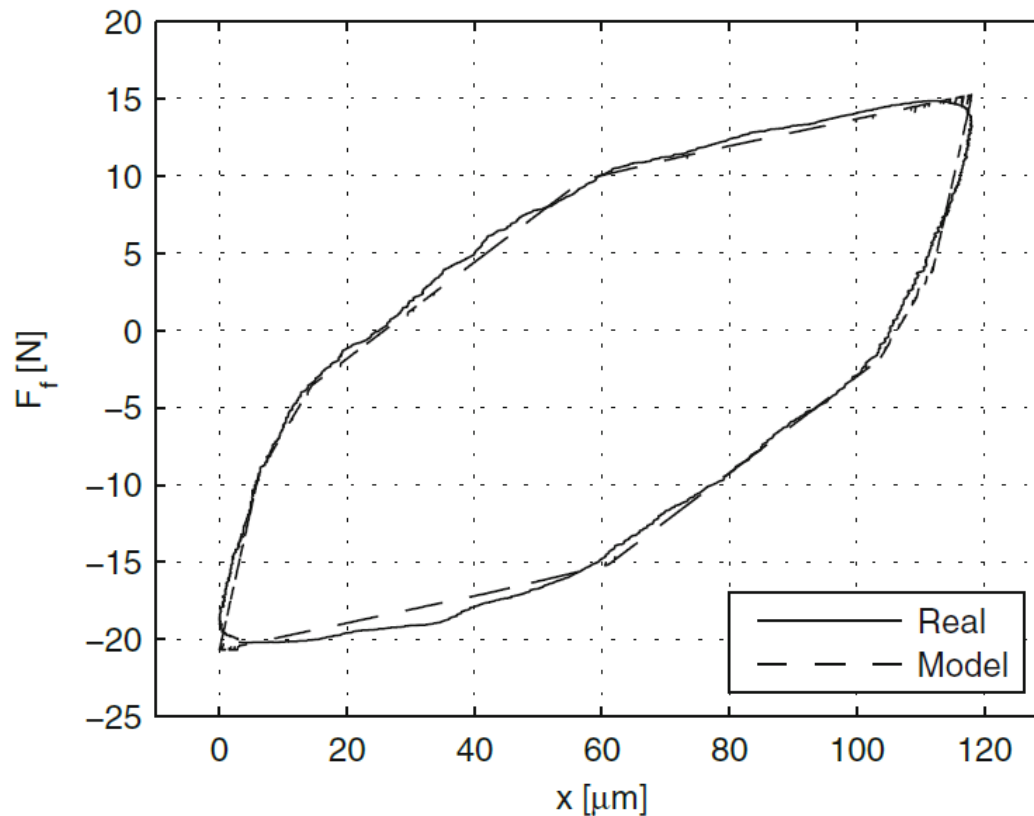
# Predeslizamiento

- Distancia de transición de predeslizamiento a deslizamiento
- Sirve para estimar el tamaño de la histéresis del predeslizamiento



# Predeslizamiento

- Curva de histéresis de predeslizamiento relevada para estimar los parámetros



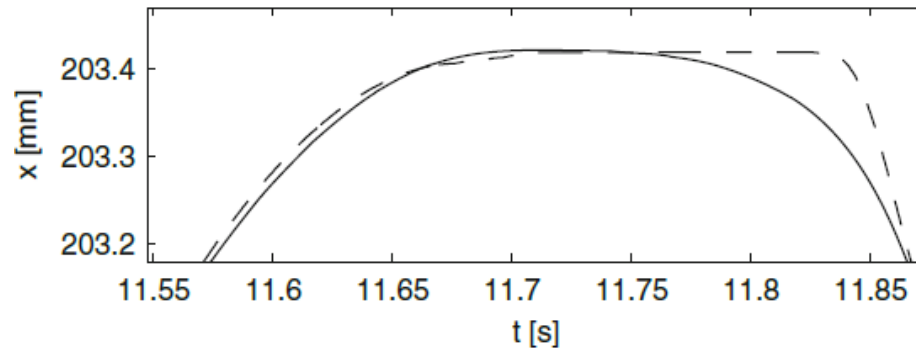
# Parámetros predeslizamiento

- Parámetros estimados para 5 elementos del modelo GMS

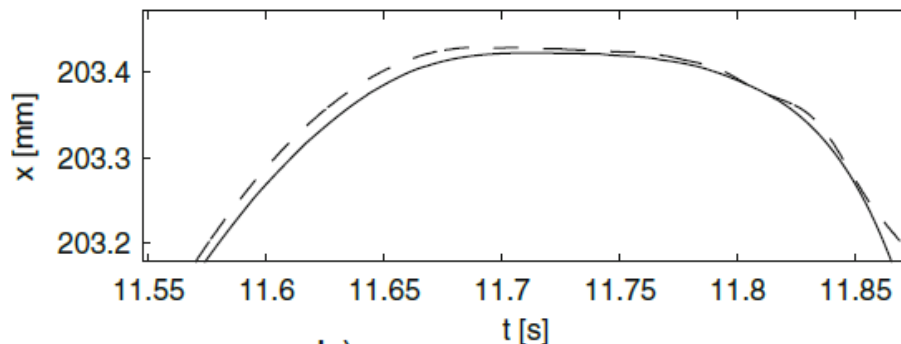
Element	$\nu_i$	$k_i \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$
1	0.17	1,152.07
2	0.13	377.23
3	0.30	215.33
4	0.017	9.39
5	0.38	87.66

# Comportamiento del modelo

- Comparación entre datos experimentales (línea sólida) y datos simulados (línea de puntos)



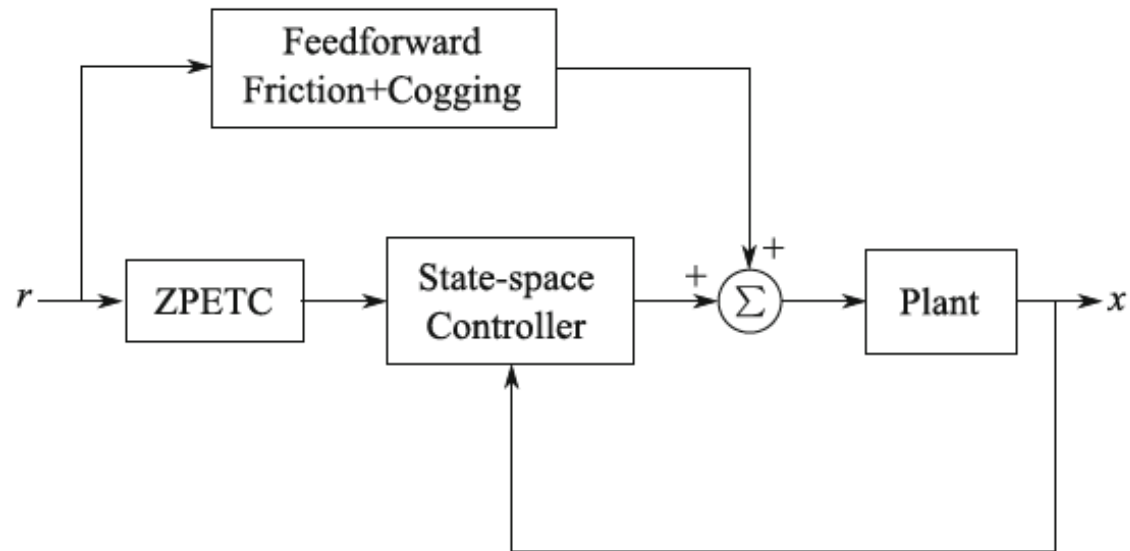
Simulación con solamente fricción estática



Simulación con el modelo GMS

# Compensación de la fricción

- Estrategia de control
  - Compensación feedforward de la fricción



# Compensación de la fricción

- Resultados experimentales
  - Reducción del error los cambios de dirección

