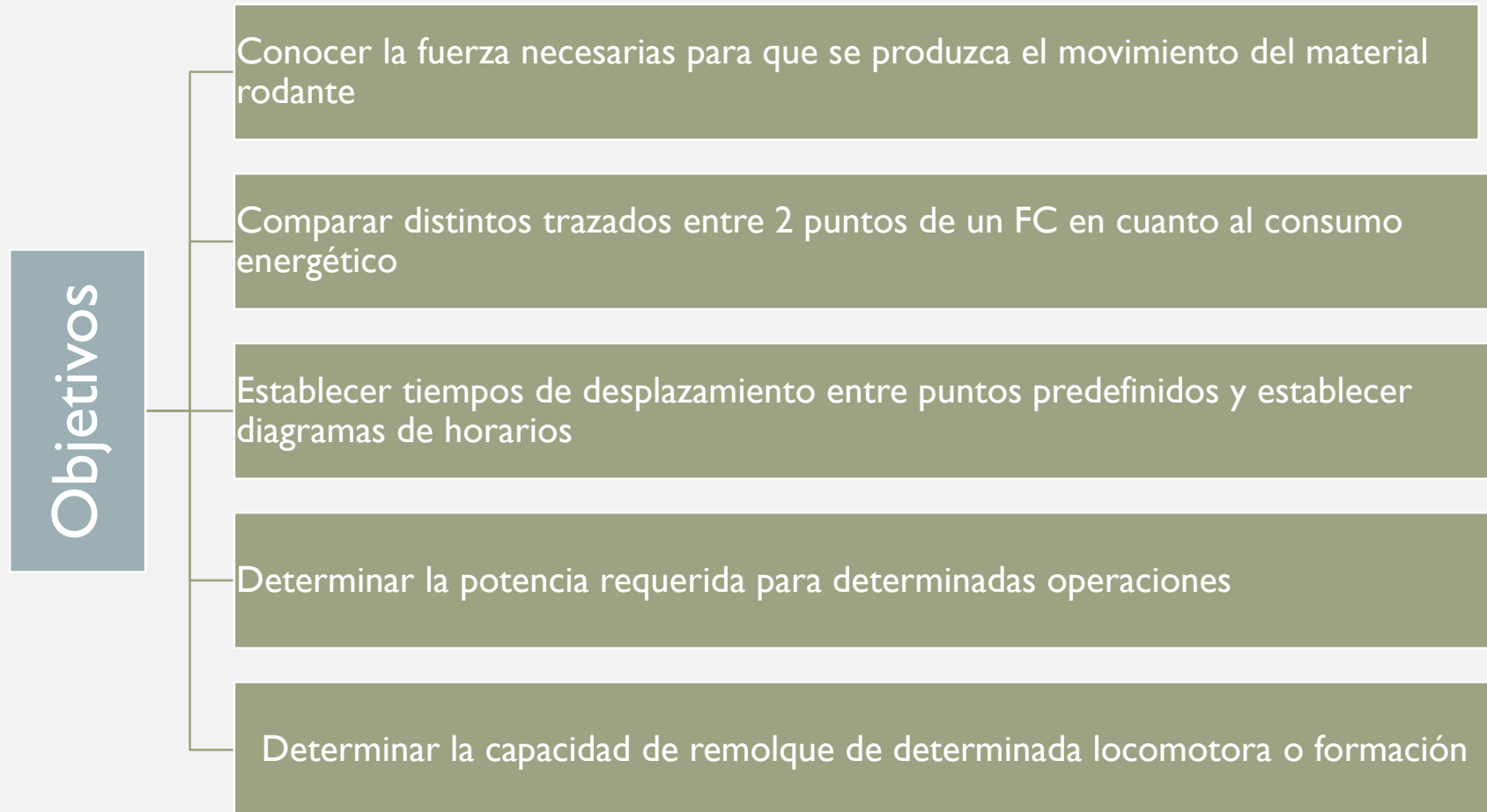
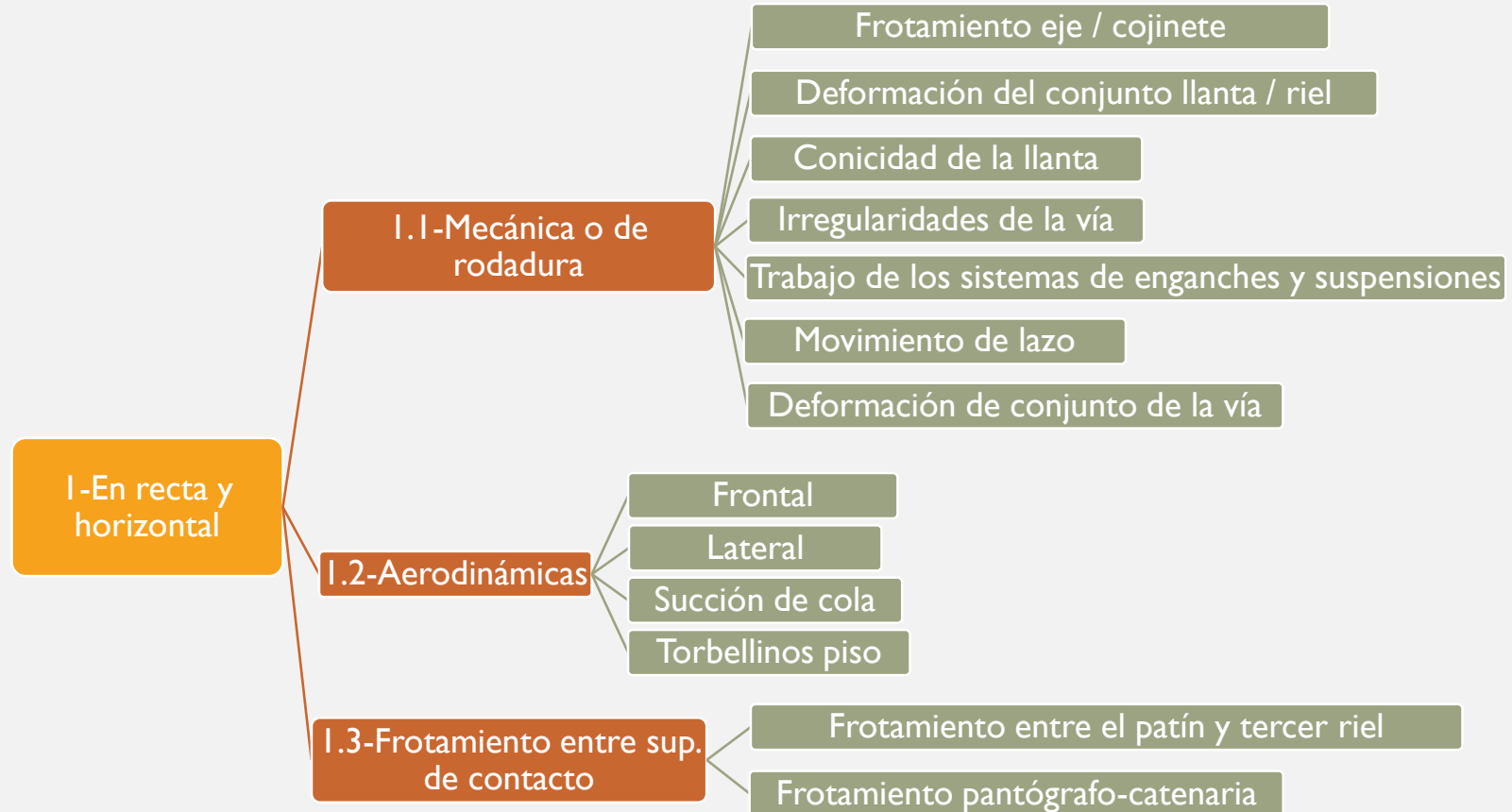


6.A-RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

MECÁNICA DE LA TRACCIÓN



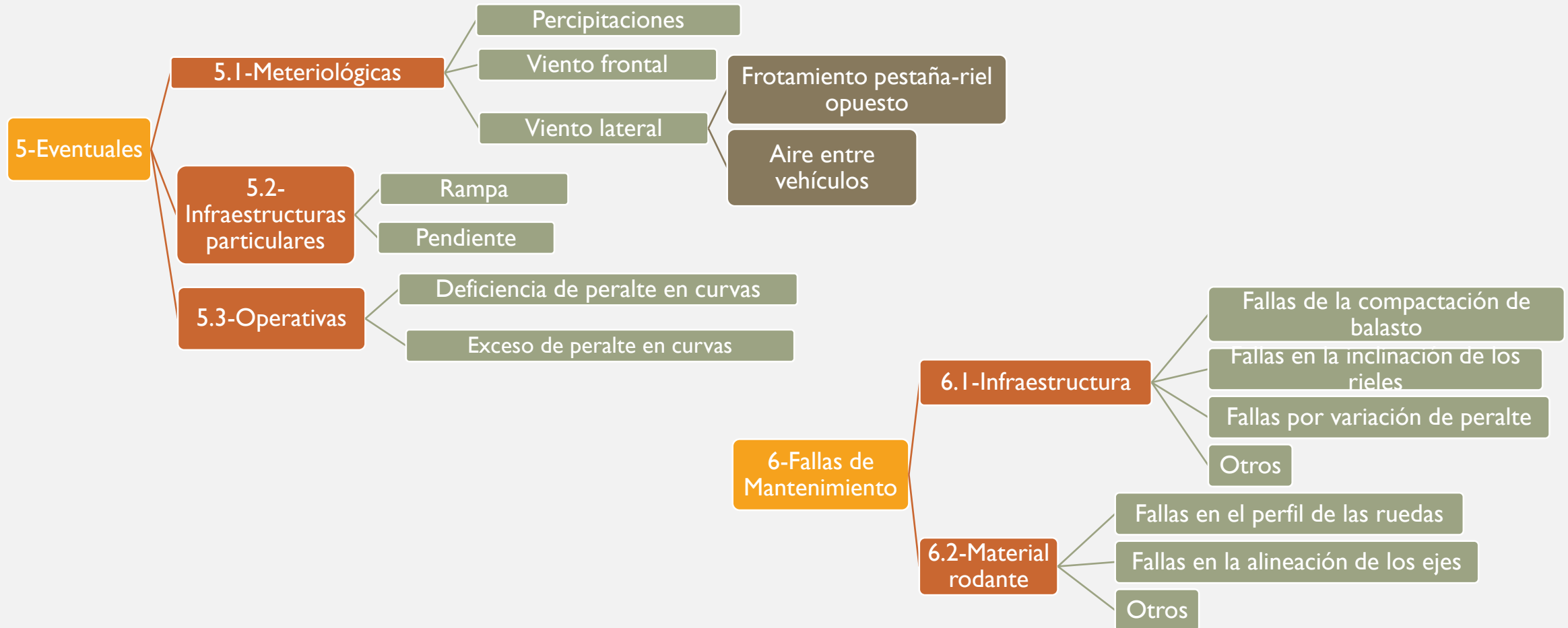
FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN



FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN



FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN



FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.1-MECÁNICAS

Frotamiento eje / cojinete

$$T = f \cdot N$$

$$N = \sqrt{(Q^2 + Fr^2)}$$

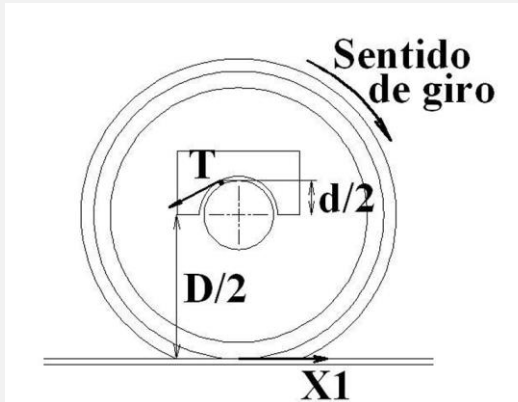
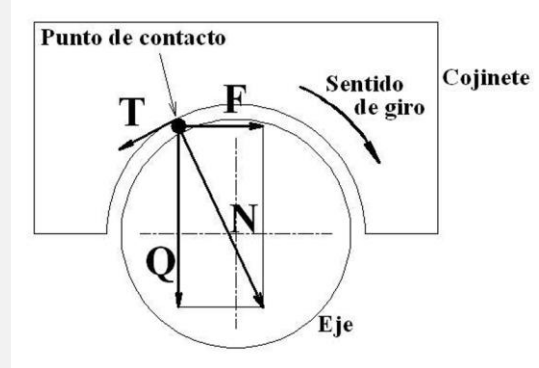
$$N = Q \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{Fr^2}{Q^2}\right)} \cong Q \text{ ya que } \frac{Fr^2}{Q^2} \ll 1$$

$$\Rightarrow T = f \cdot Q$$

$$T \cdot \frac{d}{2} = X_1 \cdot \frac{D}{2} \Rightarrow X_1 = T \cdot \frac{D}{d} = f \cdot Q \cdot \frac{D}{d}$$

$$\Rightarrow X_1 = f \cdot Q \cdot \frac{D}{d} [tn]$$

$$x_1 = f \cdot Q \cdot \frac{D}{d} \cdot \frac{1000}{Q + q} \left[\frac{kg}{tn} \right]$$



Q: Peso suspendido

Fr: Fuerza que el cojinete le transmite al eje

N: Fuerza normal resultante

T: Fuerza de frotamiento muñón-cojinete, perpendicular a N.

f: Coeficiente de frotamiento eje / cojinete

X₁: Fuerza aplicada en el borde de la llanta que produce un momento similar al producido por la fuerza de frotamiento eje / cojinete.

D: Diámetro de la rueda

d: Diámetro del muñón

q: Peso no suspendido

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.1-MECÁNICAS

$$\varphi = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta}{R}}$$

$$X_2 = \varphi \cdot (Q + q) \text{ [tn]}$$

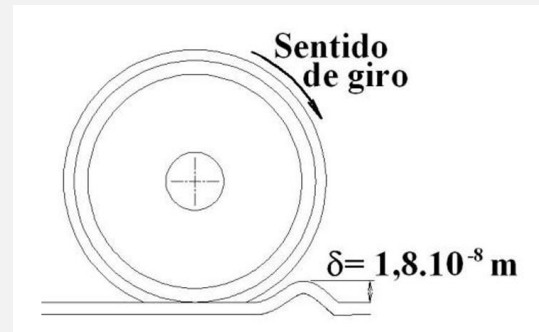
$$x_2 = X_2 \cdot \frac{1000}{Q + q} \left[\frac{kg}{tn} \right]$$

$$\tau = f \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot m} \cdot (Q + q) \cdot a$$

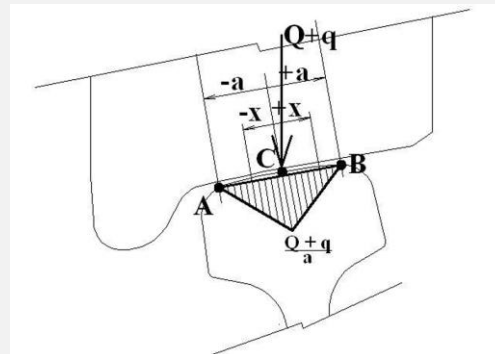
$$X_3 \cdot \pi \cdot D = f \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot m} \cdot (Q + q) \cdot a$$

$$x_3 = \frac{2 \cdot f \cdot a}{3 \cdot m \cdot D} \cdot 1000 \left[\frac{kg}{tn} \right]$$

Deformación conjunto llanta - riel



Conicidad de la llanta



Q: Peso suspendido

q: Peso no suspendido

X_2 : Fuerza aplicada en el borde de la llanta que produce un momento respecto al eje de igual magnitud al generado como consecuencia de la reacción de onda de deformación sobre la rueda.

R: Radio de la rueda

φ : Coeficiente de flexibilidad

δ : Altura de onda

X_3 : Fuerza aplicada en el borde de la llanta que produce el mismo trabajo durante un giro que el que producen la fuerzas de rozamiento en el resbalamiento riel llanta por conicidad de esta última

τ : Fuerza de rozamiento durante un giro de la rueda

m: Pendiente de la conicidad (1:20 o 1:40 = 1:m)

f: Coeficiente de frotamiento llanta - riel

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.1-MECÁNICAS

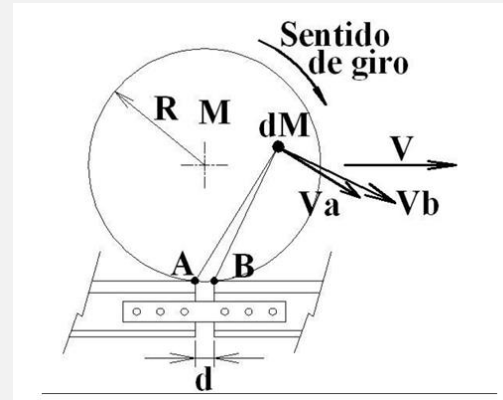
Discontinuidades de la vía (juntas)

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{g} \cdot \omega^2 \cdot d^2$$

$$X_4 \cdot L = \frac{L}{l} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{g} \cdot \omega^2 \cdot d^2$$

$$x_4 = \frac{q \cdot v^2 \cdot d^2}{R^2 \cdot l \cdot g} \cdot \frac{1000}{Q + q} \left[\frac{kg}{tn} \right]$$

$$x'_4 = \frac{q}{g} \cdot \frac{v^2 \cdot h}{R \cdot l} \cdot \frac{1000}{Q + q} \left[\frac{kg}{tn} \right]$$



Q: Peso suspendido

q: Peso no suspendido

X_4 : Fuerza aplicada en el borde de la llanta que produce el mismo trabajo que la variación de energía cinética generada por la existencia de las juntas durante una longitud L de análisis.

$$\omega = \frac{v}{R} \quad n(\text{número de juntas}) = \frac{L}{l}$$

R: Radio de la rueda

X'_4 en general es mas importante que X_4 pero está relacionado mas a una falla de mantenimiento que a la discontinuidad normal de una junta.

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.1-MECÁNICAS

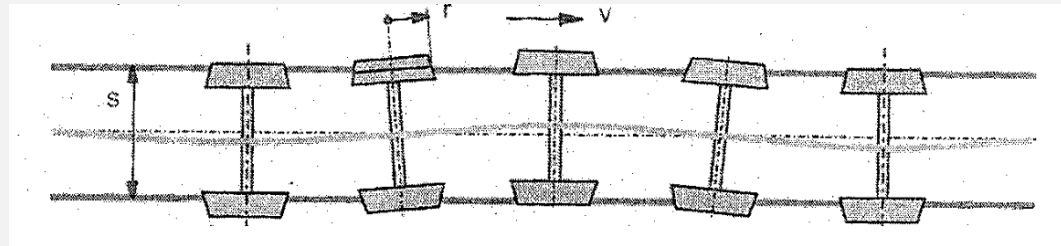
Resistencias debido al trabajo de los sistemas de enganche y suspensiones

$$X_5 = k \cdot v(km/h)$$

X_5 : Fuerza que surge debida a la pérdida de energía producida por deslizamiento de distintas superficies entre sí en los sistemas de enganche

Resistencias debido al movimiento de lazo

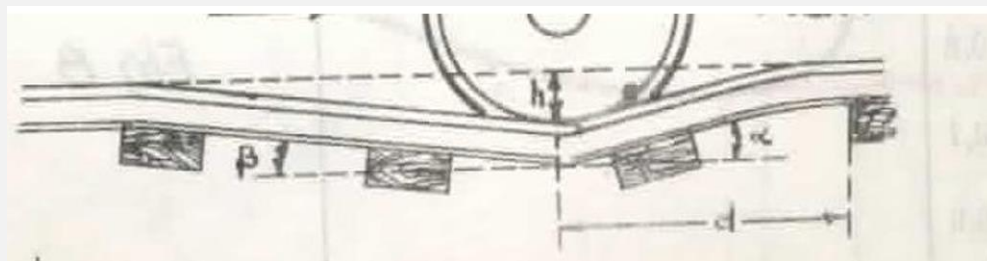
$$X_6 = k_1 \cdot v(km/h)$$



X_6 : Fuerza que surge a partir de movimiento alternativo producido por la forma tronco cónica de las llantas y el rozamiento del borde activo de la pestaña con el riel.

Resistencias debido a la deformación del conjunto de vía (golpe de vía)

$$x_7 = \frac{1020 \cdot h}{2 \cdot d} \left[\frac{kg}{tn} \right]$$



X_7 : La expresión de la fuerza equivalente, surge del estudio experimental de Wilson

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.2-AERODINÁMICAS

Resistencia Frontal

$$X_8 = z \cdot \frac{\delta}{g} \cdot s \cdot v^2 (km/h)$$

$$x_8 = \frac{X_8}{(Q + q)} (kg/tn)$$

X_8 : Esta fuerza depende de la forma de la superficie de ataque del tren (locomotora o coche de cabeza), de la magnitud de la misma, de la densidad del fluido (aire), y del cuadrado de la velocidad.

Z : coeficiente de forma

s : valor de superficie

δ : es la densidad del flujo

g : aceleración de la gravedad

V : velocidad

Para superficies cuadradas, z varía desde 0,48 a 0,64 para valores de s de 0,10 a 1 m², luego de 1 m², z no varía, valiendo 0,64.

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.2-AERODINÁMICAS

Resistencia Lateral

X'_g : Es la que la “rugosidad” del lateral del tren al desplazarse por el fluido aire (es mas importante en túneles). En túneles es relativamente importante. Se trata de valores que son experimentales, puede tenerse en cuenta según la siguiente fórmula:

$$X'_g = 0,000305 \times \text{sup lateral} \times V^2$$

Resistencia por torbellinos

Debido a remolinos de aire que se generan debajo de la formación al circular. Depende del largo de los coches y de las características del bajo piso.

Sus efectos están tenidos en cuenta en ecuaciones generales y depende del cuadrado de la velocidad.

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.2-AERODINÁMICAS

Resistencia por succión de cola

Al final del tren se genera un vacío que, por ejemplo succiona partículas sueltas al paso de la formación, depende de la forma del último vehículo del tren y de la velocidad.

En trenes de baja velocidad la resistencia preponderante es la frontal, en trenes de alta velocidad ninguna es despreciable.

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.3-FROTAMIENTO ENTRE SUPERFICIES DE CONTACTO EN VÍAS ELECTRIFICADAS

Resistencia por frotamiento entre el patín y tercer riel

Es el caso donde la energía es provista por un tercer riel, y la energía es transmitida al motor de tracción por un patín ubicado en el coche.

El patín alberga una pastilla, dicho conjunto pastilla-patín contacta al tercer riel con una fuerza x kg, por lo que la fuerza de rozamiento es: $u \cdot x$ (donde u es el coeficiente de rozamiento entre pastilla y tercer riel, entonces:

$$x_9 = \frac{n \cdot x \cdot u}{(Q + q)} (kg/tn) \quad n: \text{cantidad de patines en contacto}$$

Resistencia debido al frotamiento entre el pantógrafo y la catenaria

Su determinación se realiza en forma análoga a la descrita para el patín/tercer riel:

- Es de orden menor desde el punto de vista mecánico que la resistencia descrita en el ítem anterior.
- Es de orden mayor desde el punto de vista aerodinámico que la resistencia descrita en el ítem anterior.

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.4-FÓRMULAS GLOBALES EXPERIMENTALES DE LA RESISTENCIA AL AVANCE EN RECTA Y HORIZONTAL

De acuerdo a lo visto en los puntos anteriores, se han obtenido modelos que responden a la siguiente expresión:

$$x(kg/tn) = a + b.v + c.v^2$$

a: depende del diseño y peso del rodado, conicidad de la llanta, rigidez de los materiales, coeficiente de fricción eje-cojinete, coeficiente de fricción rueda-riel

b: depende de características del sistema de acople, sistema de suspensiones, y frotamiento entre caras activas de los rieles y las pestañas debida al movimiento de lazo.

c: depende de la forma del frente de la locomotora, superficie frontal, flujo de aire que atraviesa, peso de todo el tren.

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.4-FÓRMULAS GLOBALES EXPERIMENTALES DE LA RESISTENCIA AL AVANCE EN RECTA Y HORIZONTAL

Fórmula de Davis

Para vagones:

$$r_{ov} = 0,65 + \frac{13,15}{q} + 0,01398 \cdot v + 0,0009428 \cdot s \cdot \frac{v^2}{n \cdot q}$$

Para coches:

$$r_{oc} = 0,65 + \frac{13,15}{q} + 0,00932 \cdot v + 0,0006411 \cdot s \cdot \frac{v^2}{n \cdot q}$$

Para locomotoras:

$$r_{ol} = 0,65 + \frac{13,15}{q} + 0,00932 \cdot v + 0,004525 \cdot s \cdot \frac{v^2}{n \cdot q}$$

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.4-FÓRMULAS GLOBALES EXPERIMENTALES DE LA RESISTENCIA AL AVANCE EN RECTA Y HORIZONTAL

Fórmula de Davis

Para coches eléctricos “cabeza” de unidades autopropulsadas:

$$r_{ov} \left(\frac{kg}{tn} \right) = 0,65 + \frac{13,15}{q} + 0,014 \cdot v + 0,0045 \cdot s \cdot \frac{v^2}{n \cdot q}$$

q: peso por eje (tn)

v: velocidad de desplazamiento (km/h)

s: superficie frontal (m²)

Para coches eléctricos intermedios de unidades autopropulsadas:

n: N° de ejes de Toda la formación de análisis,
es decir, n.q es el peso de todo el tren.

$$r_{oc} \left(\frac{kg}{tn} \right) = 0,65 + \frac{13,15}{q} + 0,014 \cdot v + 0,000639 \cdot s \cdot \frac{v^2}{n \cdot q}$$

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.4-FÓRMULAS GLOBALES EXPERIMENTALES DE LA RESISTENCIA AL AVANCE EN RECTA Y HORIZONTAL

Fórmula de Dover para trenes eléctricos autopropulsados

$$r_{ov} \left(\frac{kg}{tn} \right) = 1,83 + 0,0134 \cdot v + (0,0053 \cdot k + 0,000075 \cdot n \cdot L) \cdot s \cdot \frac{v^2}{n \cdot q}$$

L: longitud de un coche

n: N° de coches de la formación

s: superficie frontal (m²)

P: peso total de la formación.

k: Coef. De forma

k=1 superficie plana

k=0,66 superficie semiesférica

k=0,3 superficie parabólica

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS EN RECTA Y HORIZONTAL

1.4-FÓRMULAS GLOBALES EXPERIMENTALES DE LA RESISTENCIA AL AVANCE EN RECTA Y HORIZONTAL

Resistencia específica global de una formación compuesta

$$r_o \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{r_{ol} \cdot P_l + r_{ov} \cdot P_v + r_{oc} \cdot P_c}{P_c + P_v + P_l}$$

En el caso de trenes de alta velocidad, los mismos se evalúan como unidades indivisibles, y el fabricante utiliza fórmulas de resistencia al avance absolutas del tipo:

$$R(kg \text{ o } N) = A + Bv + Cv^2$$

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

2.1-RESISTENCIAS PLANIMÉTRICAS

Son las debidas a la aparición de curvas horizontales en el trazado, para que el bogie pase de la posición ABCD a A'B'C'D', surgen los siguientes fenómenos:

1- Resistencia por resbalamiento longitudinal: A la ausencia de mecanismo diferencial (en el par montado), se produce resbalamientos ya que las ruedas de un mismo par montado, recorren distintas longitudes (la rueda externa recorre mayor longitud que la interna) produciéndose resbalamiento mutuamente.

$$C_1 = \frac{f \cdot p \cdot s}{2 \cdot R}$$

$$c_1 \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{f \cdot s}{2 \cdot R} \times 1000$$

C1: Fuerza ficticia que aplicada en el borde de la llanta genera un trabajo equivalente al producido por las fuerzas de rozamiento debida a los corrimientos longitudinales durante una curva de radio R.

p: peso que se descarga sobre las ruedas (suspendido + no suspendido).

S: trocha

R: radio de la curva

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

2.1-RESISTENCIAS PLANIMÉTRICAS

2- Resistencia de resbalamiento transversal o radial: En la curva el vehículo va girando sobre si mismo en torno a un eje vertical, haciendo que las llantas resbalen transversalmente sobre el riel. Esta resistencia se genera debido a la dificultad de inscribir 2 o más ejes paralelos a una distancia "l" (empate) del bogie en un sector circular.

$$C_2 = \frac{f \cdot p \cdot l}{2 \cdot R}$$

$$c_2 \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{f \cdot l}{2 \cdot R} \times 1000$$

C2: Fuerza ficticia que aplicada en el borde de la llanta genera un trabajo equivalente al producido por las fuerzas d rozamiento debida a los corrimientos radiales durante una curva de radio R.

l: longitud de la base rígida (empate)

S: trocha

R: radio de la curva

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

2.1-RESISTENCIAS PLANIMÉTRICAS

3- Resistencia por resbalamiento tangencial: debido al ataque de la pestaña sobre el borde interno del riel externo para el guiado del vehículo en la curva.

$$C_3 = \frac{f^2 \cdot P}{4 \cdot l} \left(l + \sqrt{l^2 + s^2} + s \right) + f \cdot \frac{P}{4 \cdot R} \cdot \left(l + \sqrt{l^2 + s^2} + s \right)$$

$$c_3 \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{C_3}{P} \times 1000$$

$$c \left(\frac{kg}{tn} \right) = c_1 + c_2 + c_3$$

c: Fuerza total de resistencia al avance en curva

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

2.1-RESISTENCIAS PLANIMÉTRICAS

4- Fórmulas experimentales:

Desdovits:

$$r_c \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{500 \cdot t(m)}{R(m)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_c \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{800}{R(m)} \\ r_c \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{717}{R(m)} \\ r_c \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{500}{R(m)} \end{array} \right.$$

Trocha ancha

Trocha media

Trocha angosta

t: trocha

R: radio de curva

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

2.1-RESISTENCIAS PLANIMÉTRICAS

4- Fórmulas experimentales:

Schneidewind:

$$\left\{ \begin{array}{ll} r_c \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{190 \cdot l(m)}{R(m)} & \text{Trocha ancha} \\ r_c \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{200 \cdot l(m)}{R(m)} & \text{Trocha media} \\ r_c \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{210 \cdot l(m)}{R(m)} & \text{Trocha angosta} \end{array} \right.$$

l: empate

R: radio de curva

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

2.1-RESISTENCIAS PLANIMÉTRICAS

4- Fórmulas experimentales:

Krupp:

$$r_c \left(\frac{kg}{tn} \right) = \frac{120. (t + l)}{R}$$

t: trocha (m)

l: empate (m)

R: radio de curva (m)

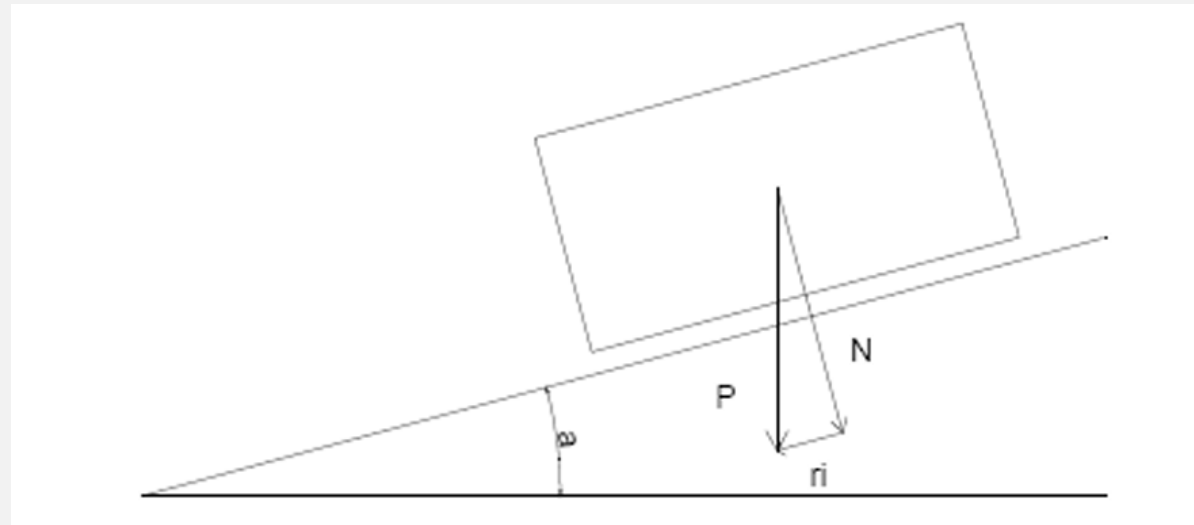
FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

2.2-RESISTENCIAS ALTIMÉTRICAS

- Se denomina **“rampa”** a toda variación creciente en la cota de la rasante.
- Se denomina **“pendiente”** a toda variación decreciente en la cota de la rasante.

$$R_l = P \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

$$r_i \left(\frac{kg}{tn} \right) = i\%$$



FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

3.1-ACELERACIÓN LINEAL

A partir de la segunda ley de Newton $Rg' = \frac{P}{g} \times \frac{dv}{dt}$ Y expresando Ri en kg y P en tn $Rg' = 1000 \cdot \frac{P}{g} \times \frac{dv}{dt}$

Por lo tanto la fuerza en kg por cada tn de peso será:

$$rg' = \frac{1000}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

Si se toma P=1tn, y g=9,81m/s²

$$Rg' = \frac{1000 \frac{kg}{tn}}{9,81 \frac{m}{s^2}} \times 1tn \times \frac{dv}{dt} = 101 \frac{kg \times s^2}{m} \times \frac{dv}{dt} \cong 100 \frac{kg \times s^2}{m} \times \frac{dv}{dt}$$

Si se desea acelerar una formación a 100km/h en 2min.

$$Rg' = 100 \frac{kg \times s^2}{m} \times \frac{100km}{2min} = 100 \frac{kg \times s^2}{m} \times 0,23 \frac{m}{s^2} = 23kg$$

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

3.1-ACELERACIÓN LINEAL

Aceleraciones de referencia

- Trenes de carga 0,05 a 0,07 m/s²
- Trenes de pasajeros (servicio general) mínimo 0,10
- Trenes sub urbanos mínimo 0,40 m/s²
- Subterráneos mínimo 0,7 m/s²

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

3.2-ACELERACIÓN ANGULAR

Aplicando conceptos de cuerpo rígido para masas rotantes.

$$\tau = J \times \frac{d\omega}{dt}$$

τ : Par resistente

J: Momento de inercia de la masa que rota respecto a un eje
 $d\omega/dt$: aceleración angular

La fuerza de resistencia debida a masas en rotación es:

$$Rg'' = \frac{q \cdot \rho^2}{g \cdot r^2} \times \frac{dv}{dt}$$

ρ : Radio de inercia polar

r: Radio de la rueda

Q: Peso no suspendido

$$Rg'' = 1000 \times k \times \frac{P}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

$$k = \frac{q \cdot \rho^2}{g \cdot r^2}$$

Resistencia total de inercia:

$$Rg = Rg' + Rg'' = 1000 \times (1 + k) \times \frac{P}{g} \times \frac{dv}{dt} = 1000 \times \alpha \times \frac{P}{g} \times \frac{dv}{dt}$$

Donde: $\alpha = (1 + k)$ Coeficiente de las masas rotantes

FUERZAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-RESISTENCIAS LOCALES O PLANIALTIMÉTRICAS

3.2-ACELERACIÓN ANGULAR

Coeficiente α de referencia

-Locomotoras eléctricas	$\alpha=1,30$ a $1,4$
-Locomotoras dieseleléctricas	$\alpha=1,30$ a $1,4$
-Coche remolcados	$\alpha=1,07$ a $1,08$
- Coche eléctricos motrices	$\alpha=1,12$ a $1,2$
-Vagones vacíos	$\alpha=1,09$ a $1,1$
-Vagones cargados	$\alpha=1,05$ a $1,06$