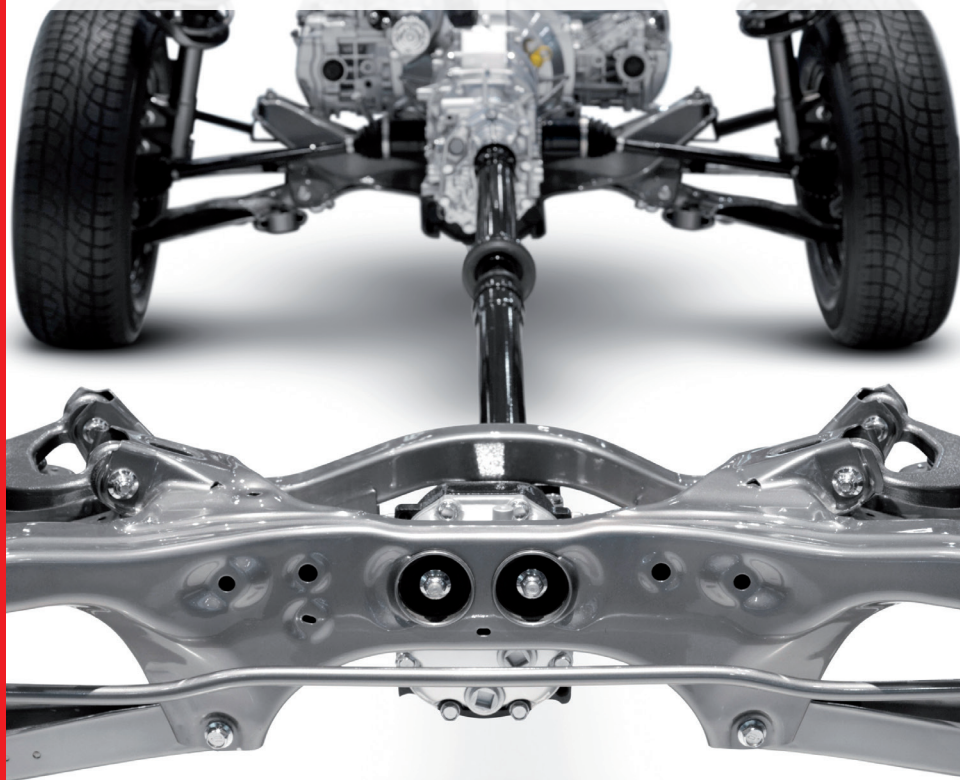


Unitat 1

Principis bàsics dels sistemes de transmissió en vehicles



Preguntes inicials

1.. Quines forces intervenen en els desplaçaments dels vehicles?

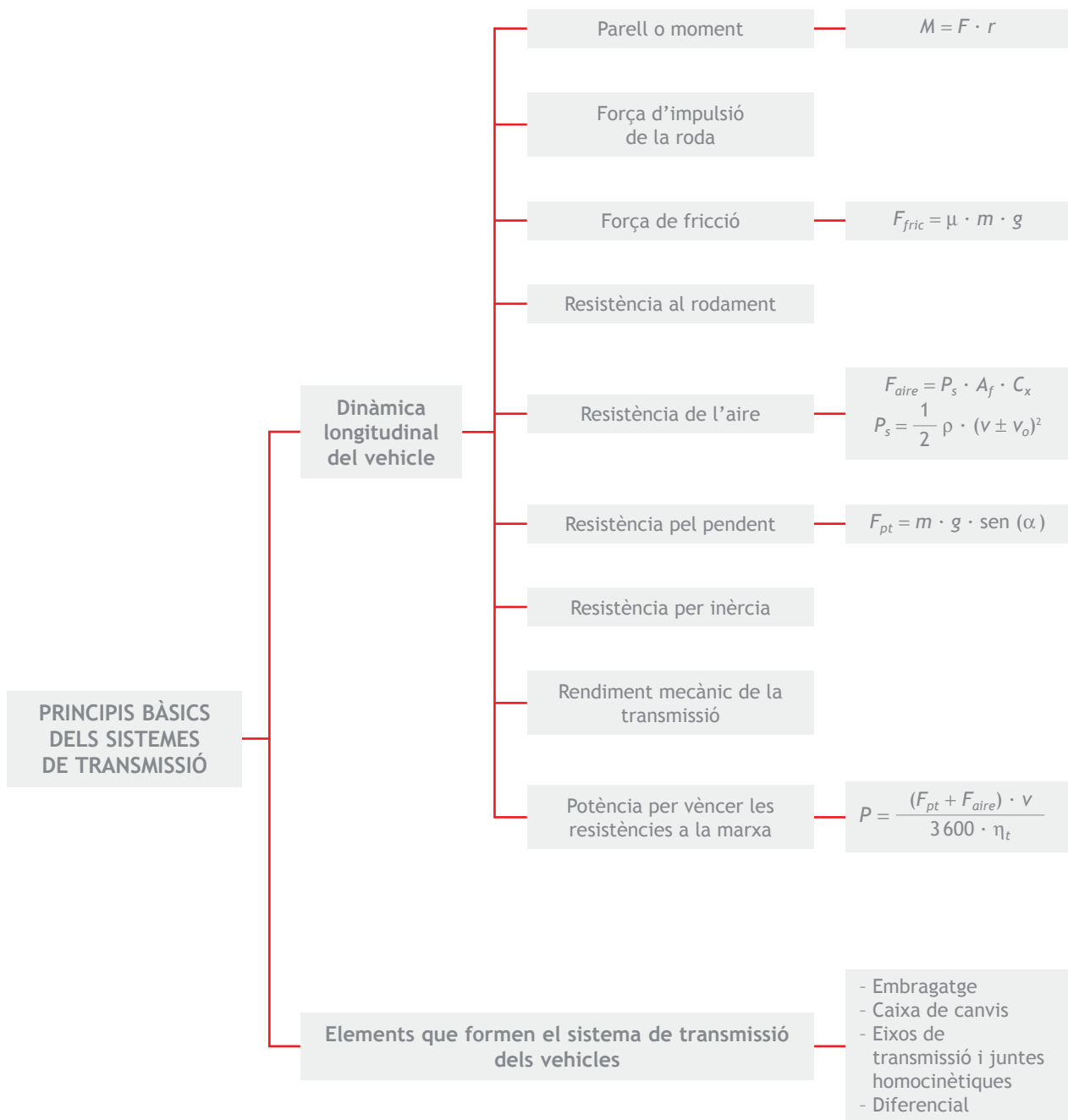
2.. Què és el coeficient de fricció del pneumàtic amb el terreny?

3.. Per què costa als vehicles pujar els pendents?

4.. Saps esmentar algun dels elements que formen la cadena cinemàtica del vehicle?

En aquesta unitat aprendràs a...

- Distingir les forces que intervenen en la marxa del vehicle.
- Conèixer les forces que intervenen en el gir de les rodes.
- Identificar la resistència que l'aire oposa a la marxa dels vehicles.



Per al projecte final

- Aprenderàs a calcular la força de l'aire en el desplaçament d'un vehicle.
- Comprovaràs que en la transmissió del moviment es produeixen pèrdues per friccions mecàniques i per canvis de direcció del moviment.

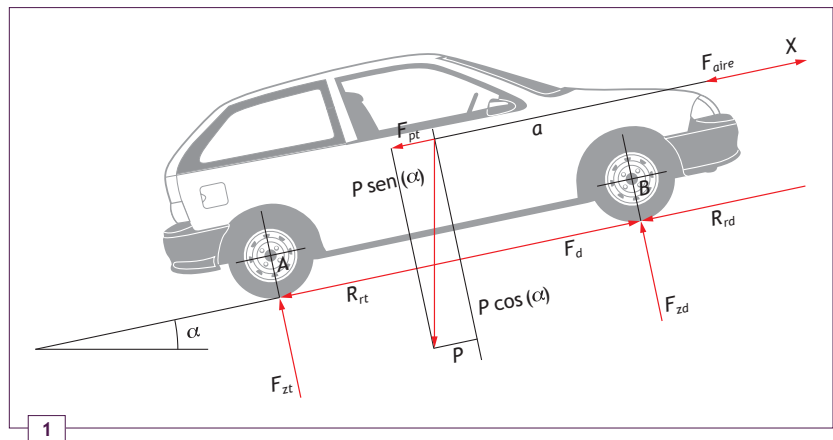
1 >> Dinàmica longitudinal del vehicle

La potència i el parell de gir subministrats pel motor del vehicle es transmeten a les rodes i produeixen una força d'impulsió que dona lloc al desplaçament del vehicle.

Aquesta força d'impulsió ha de vèncer les forces resistents que s'oposen al desplaçament del vehicle per aconseguir que avanci.

Les forces que actuen en el desplaçament longitudinal són les següents (figura 1):

- F_d : esforç de tracció de les rodes motrius.
- F_{zt} i F_{zd} : forces de reacció en les rodes del davant i del darrere, perpendiculars al terreny i d'igual magnitud que el pes que gravita sobre cada roda.
- F_{aire} : força de resistència aerodinàmica.
- F_{pt} : força de resistència deguda al pendent.
- R_{rd} i R_{rt} : resistència al rodament de les rodes del davant i del darrere, respectivament.



1
Dinàmica longitudinal del vehicle.

Si apliquem la segona llei de Newton per a l'eix X de desplaçament longitudinal, tenim la fórmula següent:

$$\sum F_x = m \cdot a_x$$

El sumatori de les forces que actuen sobre un vehicle, de massa m , produirà el seu desplaçament amb una acceleració a_x . Per tant, per calcular el desplaçament, se sumen les forces que produeixen l'avanç del vehicle i, al resultat, se li resten les que s'hi oposen. Si el resultat final és positiu, el vehicle es desplaçarà amb una determinada acceleració:

$$m \cdot a_x = F_d - R_r - F_x \cdot a - P \sin(\alpha)$$

Un cop que el vehicle es desplaça amb una velocitat constant, l'acceleració és igual a zero i les forces aplicades al damunt seu per desplaçar-lo són de la mateixa longitud i de sentit contrari a les que s'oposen a aquest desplaçament.

1.1 > Força d'impulsió en la roda

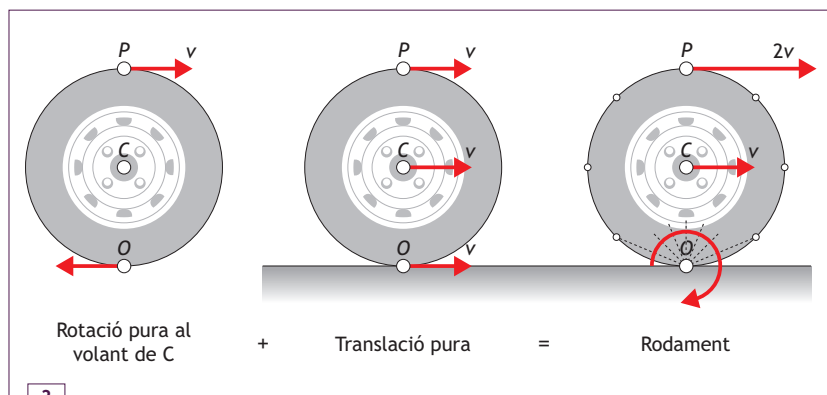
L'estudi matemàtic del moviment de les rodes d'un vehicle quan els arriba el moviment del sistema de transmissió, es realitza mitjançant una magnitud anomenada **parell** o **moment** (M).

El parell d'una força (F) respecte d'un punt (O) es defineix com el producte de la força per la distància mínima (r) des d'aquest punt al punt d'aplicació de la força (figura 2):

$$M = F \cdot r$$

El moviment de rodament de les rodes és la suma de dos moviments simultanis: un de rotació respecte del seu eix i un altre de translació sobre el terreny (figura 3).

Per tal que aquesta condició es compleixi, és necessari considerar que la roda, de manera instantània, gira respecte del punt de contacte amb el terra. Com que la roda avança, aquest punt de la roda gira i és substituït per un altre punt de contacte.



3 Moviment de rotació, de translació i de rodament de la roda respecte del seu eix.

Per tal que es produeixi el gir de la roda respecte del punt de contacte, intervenen dues forces:

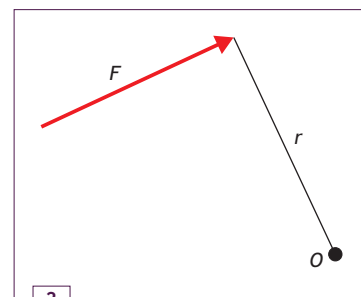
- La **força tangencial** (F_t), aplicada a la roda pel parell de gir que rep del motor.
- La **força de fricció** o **adherència** (F_{fric}), paral·lela al terra, aplicada en el punt de contacte, que evita que la roda patini.

L'acció de la força tangencial aplicada a la roda crea un parell de gir que produeix el desplaçament de la roda i apareix una força d'impulsió (F_i) en el seu eix de rotació.

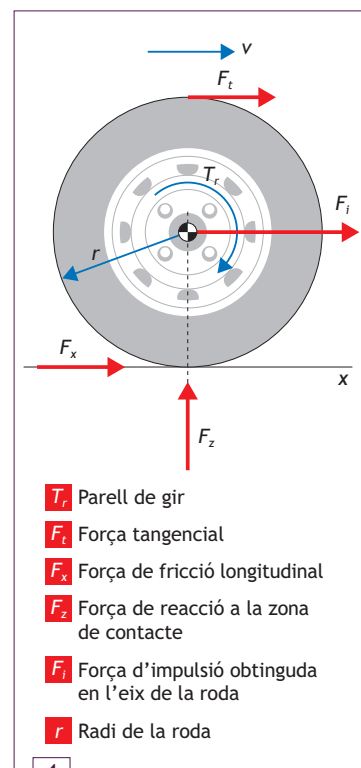
Amb el producte d'aquesta força pel radi de la roda (r) s'obté el parell de tracció de la roda (M_t):

$$M_t = F_t \cdot r$$

És important no oblidar-se que, per tal que aquest parell de gir produeixi la rotació de la roda respecte del punt de contacte del pneumàtic amb el terra, ha d'existir la força de fricció.



2 Parell d'una força.



4 Forces que actuen en la roda.

Coefficient de fricció

El coeficient de fricció (μ) que afecta els vehicles depèn del tipus de pneumàtic, de l'àrea de contacte del pneumàtic amb el terreny, i del tipus i l'estat del terreny.

Coefficients de fricció (μ)

Tipus de calçada	μ
Amb gel	0,1 aprox.
Amb neu fosa	0,2
Amb fang	0,3
D'asfalt i molla	0,4
D'asfalt sec i llis	0,5
D'asfalt rugós	0,6
D'asfalt uniforme i granulat	0,8

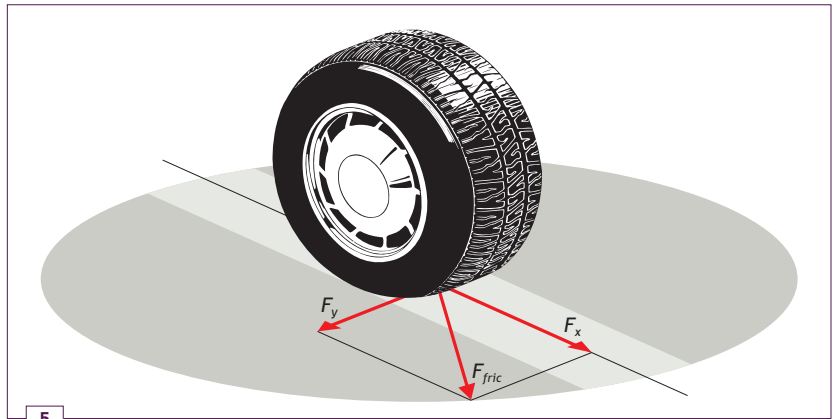
Força de fricció

La força que limita el màxim parell de tracció és la força de fricció. Quan se sobrepassa aquesta força, la roda ja no gira respecte del punt de contacte amb el terra i es produeix el lliscament o la patinada.

La força de fricció (F_{fric}) és proporcional al pes ($m \cdot g$) i al coeficient de fricció (μ):

$$F_{fric} = \mu \cdot m \cdot g$$

La força de fricció en el punt de contacte del pneumàtic amb el terra es descompon en dues forces: una en sentit longitudinal o de tracció (F_x) i l'altra en sentit transversal o de guiatge (F_y). La suma de les dues dona lloc a la circumferència (cercle de Kamm) de màxima adherència del pneumàtic a la calçada.



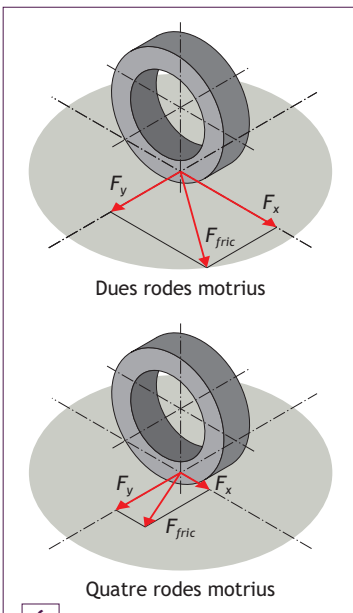
5 Cercle de Kamm.

Aquest cercle representa el límit d'adherència màxim per tal que la roda segueixi girant, transmetent la força de tracció longitudinal (F_x) i la força lateral de guiatge (F_y). Si se superen aquests límits, la roda patina.

Del cercle d'adherència de Kamm, es dedueix que els vehicles amb quatre rodes motrius presenten millors condicions d'adherència que els vehicles amb dues rodes motrius, ja que en els 4x4 el parell motor es divideix entre quatre i, d'aquesta forma, en cada roda la força de tracció aplicada és menor que en els vehicles amb dues rodes motrius i, per tant, resulta més complicat superar el cercle d'adherència màxima.

Aquesta força de fricció també intervé en la frenada. En aquest cas, el parell que es transmet a la roda és el parell de frenada i la força de fricció actua en el sentit oposat a l'avanç del vehicle. També, si se supera l'adherència màxima del pneumàtic, la roda es bloqueja sobre el terreny (llisca), fet que provoca que el vehicle no es pugui controlar i augmenta la distància de frenada.

Determinats sistemes presents en els vehicles, com ara l'ABS o l'ASR, s'encarreguen de controlar les forces que exerceix el pneumàtic sobre el terra per tal que no se superi aquesta zona d'adherència, i evitar així que el vehicle derrapi o patini.



6 Cercles de Kamm en els vehicles amb dues i quatre rodes motrius.

1.2 > Resistència al rodament

La **resistència al rodament** es produeix quan la roda, en rodar, o la superfície sobre la qual es recolza s'han deformat, encara que sigui mínimament, per les grans pressions que existeixen a la zona de contacte del pneumàtic i el terra.

La resistència al rodament deguda a la deformació del pneumàtic produeix una desacceleració de la velocitat angular de la roda i, per tant, pèrdues d'energia que escalfen el pneumàtic i la calçada.

En deformar-se el pneumàtic, les forces que treballen en l'eix vertical (Y), la càrrega que actua sobre l'eix de la roda (p) i la seva força de reacció, generada pel terreny, ja no actuen en la mateixa línia d'acció, sinó que es desplacen entre si una petita distància que ve determinada per la deformació del pneumàtic (figura 7). Aquest desplaçament es denomina **coeficient de resistència al rodament** (R_r). Així, el parell aplicat a la roda ($M_{aplicat}$) i el parell de resistència al rodament ($M_{r.rodament}$) són:

$$M_{aplicat} = F \cdot r_d \quad M_{r.rodament} = p \cdot R_r$$

Per tal que la roda comenci a rodar sobre el terreny, el parell que se li apliqui ($M_{aplicat}$) ha de ser major que el parell de resistència al rodament ($M_{r.rodament}$). Per tant, la força mínima inicial (F_0) necessària per produir el rodament serà la que iguali aquests dos moments, d'on es pot deduir el següent:

$$M_{aplicat} = M_{rodament} \Rightarrow F_0 \cdot r_d = p \cdot R_r \Rightarrow F_0 = \frac{R_r}{r_d} \cdot p$$

D'aquesta fórmula es dedueix que la força necessària per a l'inici del rodament és inversament proporcional al radi de la roda (r_d).

El valor del coeficient de resistència al rodament se sol representar amb el símbol μ_r i està condicionat per la deformació dels cossos en contacte.

1.3 > Resistència de l'aire

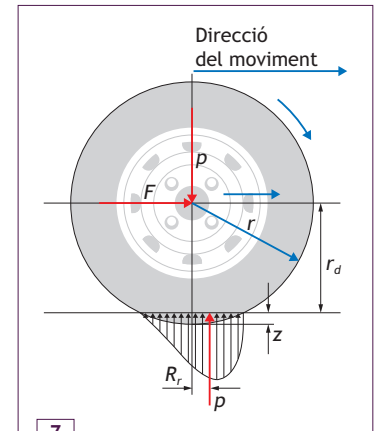
L'aire exerceix una força d'oposició en ser travessat pels vehicles. Aquesta força ve donada matemàticament per la fórmula següent:

$$F_{aire} = P_s \cdot A_f \cdot C_x$$

– P_s és la pressió superficial de l'aire, que es calcula amb la fórmula:

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v \pm v_o)^2$$

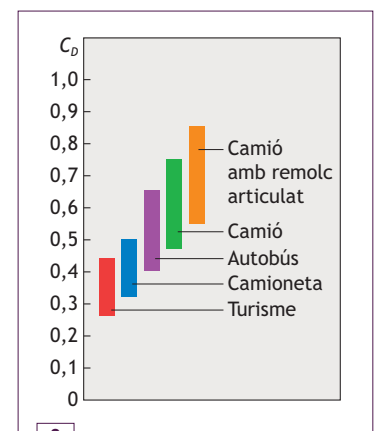
- ρ és la densitat de l'aire en kg/m^3 . En condicions normals de temperatura i pressió val $1,225 \text{ kg/m}^3$.
- v és la velocitat de marxa del vehicle en m/s.
- v_o és la velocitat del vent en m/s.
- El signe positiu indica que l'aire bufa en contra de la marxa del vehicle i el negatiu, que bufa a favor.



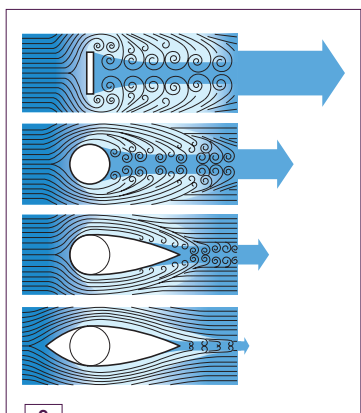
7 Resistència al rodament.

Coeficients de resistència al rodament (μ_r)

Roda / superfície	Valor
De tren/ rails	0,0002 - 0,001
Tubeless de baixa resistència	0,0015 - 0,0025
De camió / asfalt	0,006 - 0,01
De cotxe / asfalt	0,03
De cotxe / camí de terra	0,04 - 0,08
De cotxe / arena solta	0,2 - 0,4



8 Coeficients de resistència a l'aire de diferents vehicles.



9
Resistència aerodinàmica depenent de la forma.

- A_f és l'àrea frontal del vehicle en m^2 . Es calcula (essent b l'amplada i h l'altura) amb la fórmula $A_f = 0,85 \cdot b \cdot h$.
- C_x és el coeficient de resistència a l'aire de la superfície frontal del vehicle.

En funció de la forma i les dimensions de la superfície frontal del vehicle i la superfície de penetració de l'aire, es produirà una major o menor resistència de l'aire. Aquesta resistència augmenta si es generen turbulències o remolins (figura 9).

També, com es veu a la fórmula de la pressió superficial de l'aire, la resistència augmenta de forma quadràtica amb el creixement de la resultant de la velocitat del vehicle i de l'aire.

Actualment, s'estan introduint en el disseny dels vehicles els últims avenços en aerodinàmica amb la finalitat de reduir la resistència de l'aire i rebaixar el consum de combustible.

Casos pràctics

1

Càlcul de la resistència exercida per l'aire en el desplaçament del vehicle

Calcula la força exercida pel vent en el desplaçament d'un vehicle Alfa Romeo 159 quan es desplaça per una autopista amb una velocitat de 120 km/h i el vent en calma.

Solució

El vehicle en qüestió presenta un coeficient aerodinàmic (C_x) de 0,325 i les seves dimensions frontals són 1 828 mm d'ample (b) i 1 422 mm d'alt (h).

La resistència deguda a l'aire o resistència aerodinàmica ve donada per la fórmula:

$$F_{aire} = P_s \cdot A_f \cdot C_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v \pm v_o)^2 \cdot 0,85 \cdot b \cdot h \cdot C_x$$

Abans d'aplicar la fórmula, hem de tenir en compte el següent:

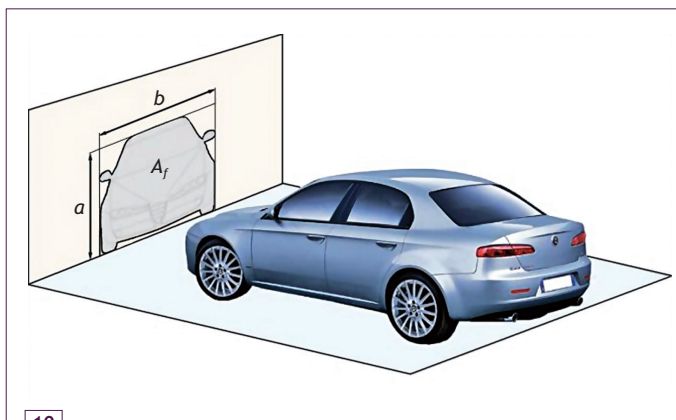
- La densitat de l'aire (ρ) en condicions normals de temperatura i pressió és d'1,225 kg/m³.
- $v_o = 0$ m/s, ja que el vent es troba en calma.
- Les mesures frontals han d'estar expressades en metres. Així, $b = 1,828$ m i $h = 1,422$ m.
- La velocitat ha d'estar expressada en m/s:

$$v = 120 \text{ km/h} = \frac{120 \cdot 1000}{3600} \text{ m/s} = 33,33 \text{ m/s}$$

D'aquesta manera, ja podem calcular la força de l'aire:

$$F_{aire} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot (33,33)^2 \cdot 0,85 \cdot 1,828 \cdot 1,422 \cdot 0,325$$

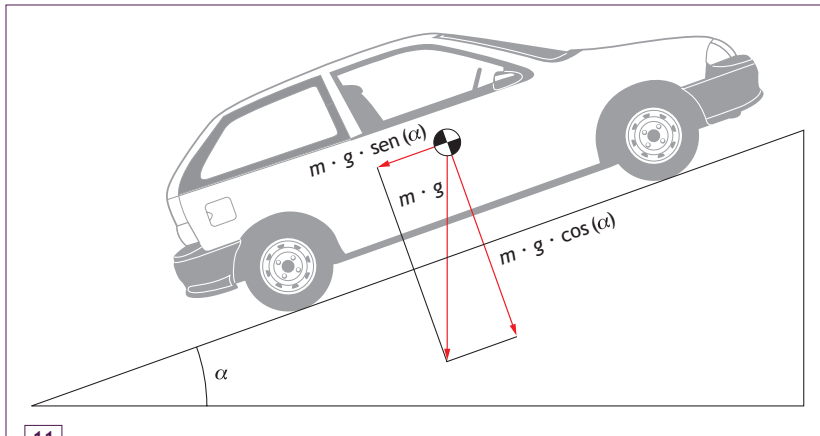
$$F_{aire} = 488,6 \text{ N}$$



10
Àrea frontal del vehicle.

1.4 > Resistència deguda al pendent

La resistència deguda al pendent dificulta l'ascensió del vehicle per un pla inclinat a causa de l'oposició d'un component del seu pes. Aquesta força de resistència s'aplica en el centre de gravetat del vehicle.



11 Diagrama de forces d'un vehicle en pendent.

El pendent

El pendent representa l'angle que forma el pla inclinat amb l'horitzontal. El pendent és la tangent d'aquest angle. Se sol indicar en percentatge.

La força de resistència deguda al pendent (F_{pt}) ve donada per la fórmula següent:

$$F_{pt} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

En què m és la massa del vehicle i g , la gravetat ($9,81 \text{ m/s}^2$).

1.5 > Resistència per inèrcia

En les forces de resistència que s'oposen al desplaçament del vehicle s'han d'incloure les forces d'inèrcia, que són unes forces que actuen quan es produeixen variacions en la velocitat, és a dir, quan apareix l'acceleració del vehicle.

Aquestes forces d'inèrcia s'oposen al fet que el vehicle canviï de velocitat i influeixen, per tant, en la seva capacitat d'acceleració i de frenada.

La força (F) d'inèrcia és representada de forma simplificada com:

$$F = m \cdot a$$

En què m és la massa del vehicle i F actua en sentit contrari a l'acceleració (a).

1.6 > Rendiment mecànic de la transmissió

En la transmissió del moviment, es produeixen pèrdues per friccions mecàniques, canvis de direcció del moviment, etc.

Aquestes pèrdues produeixen que el rendiment de la transmissió (η_t) no sigui del 100% sinó una mica inferior, al voltant del 85-90%, amb la qual cosa la potència transmesa des del motor a les rodes es veurà reduïda en una quantitat del 10 al 15%.

1.7 > Potència necessària per vèncer les resistències a la marxa

La potència (P) necessària per vèncer les resistències que s'oposen a la marxa del vehicle per tal que aquest es desplaci longitudinalment ve donada per la següent equació:

$$P = R_t \cdot v$$

En què R_t és la suma de totes les forces de resistència i v és la velocitat del vehicle.

Amb aquesta potència, el vehicle es desplaçaria amb una velocitat constant v , per ser iguals les forces d'impulsió i les forces de resistència ($F_i = R_t$) i, per tant, l'acceleració seria igual a zero.

Amb l'equació matemàtica següent s'obté la potència en kW, amb la força donada en newtons (N) i la velocitat en km/h, que desenvolupa un vehicle que circula per un pendent:

$$P = \frac{(F_{pt} + F_{aire}) \cdot v}{3600 \cdot \eta_t}$$

- F_{pt} : força de resistència pel pendent.
- F_{aire} : força de resistència de l'aire.
- η_t : rendiment de la transmissió, que sol ser del 85% = 0,85.

Casos pràctics

2

Càlcul de la potència necessària per moure un vehicle

Calcula la potència que ha d'exercir un vehicle de 1200 kg de massa per poder pujar un pendent del 14% a 30 km/h amb un vent a favor de 30 km/h.

Solució

Per realitzar el càlcul, utilitzarem la fórmula de la potència:

$$P = \frac{(F_{pt} + F_{aire}) \cdot v}{3600 \cdot \eta_t}$$

Comencem calculant les forces de resistència:

- El pendent del 14% equival a pujar un pla inclinat de 8° d'inclinació, per la qual cosa la força de resistència al pendent serà:

$$F_{pt} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 1200 \cdot 9,81 \cdot \sin(8^\circ) = 1638,35 \text{ N}$$

- Com que el vent va a favor del vehicle i a la seva mateixa velocitat, l'aire no presenta resistència:

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (30 - 30)^2 = 0 \Rightarrow F_{aire} = P_s \cdot A_f \cdot C_x = 0 \text{ N}$$

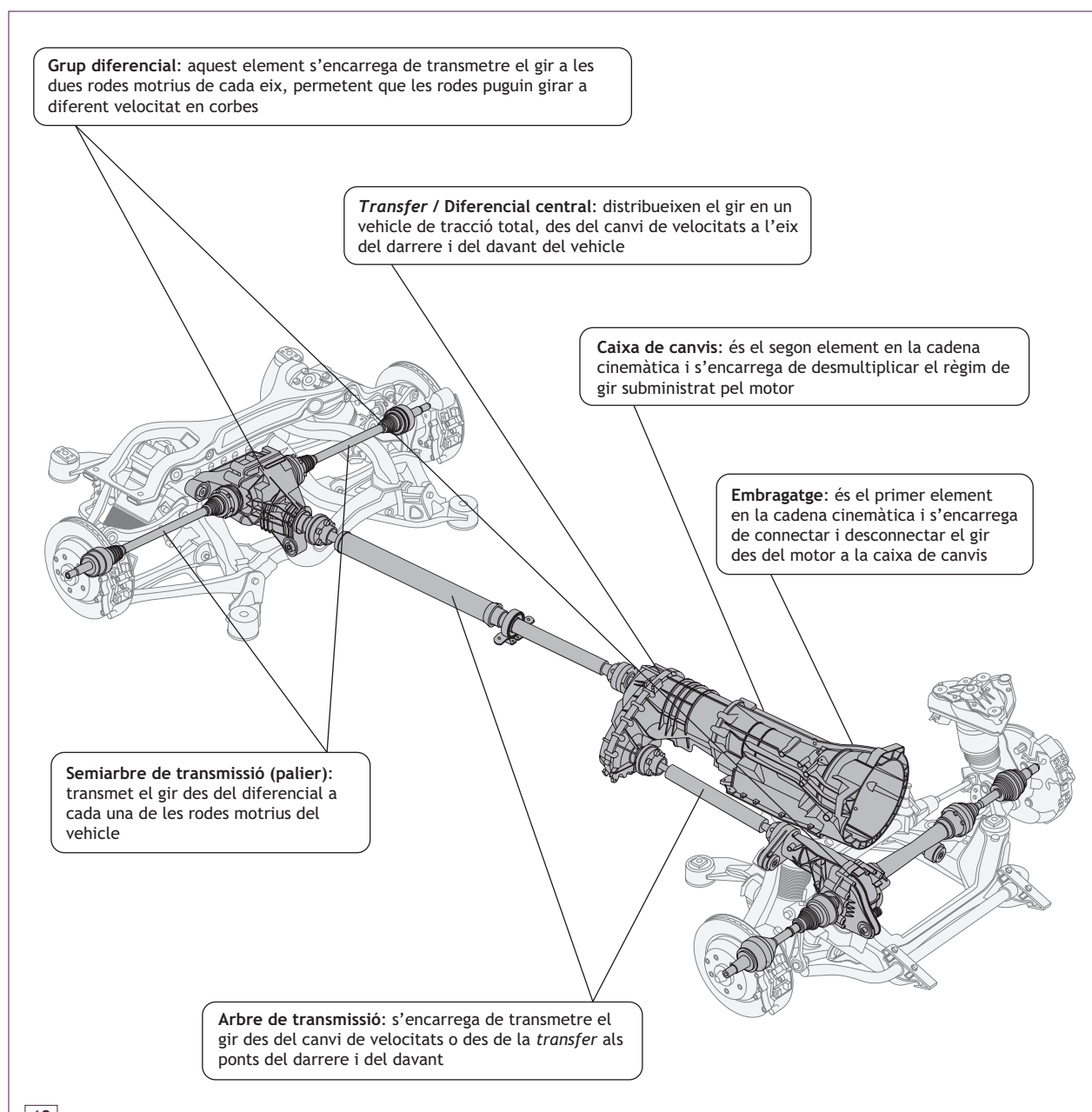
Amb l'anterior, i considerant el rendiment de la transmissió d'un 85%, la potència necessària per pujar el pendent amb una velocitat de 30 km/h serà:

$$P = \frac{(F_{pt} + F_{aire}) \cdot v}{3600 \cdot \eta_t} = \frac{(1638,35 + 0) \cdot 30}{3600 \cdot 0,85} = 16,06 \text{ kW}$$

2 >> Elements que formen el sistema de transmissió dels vehicles

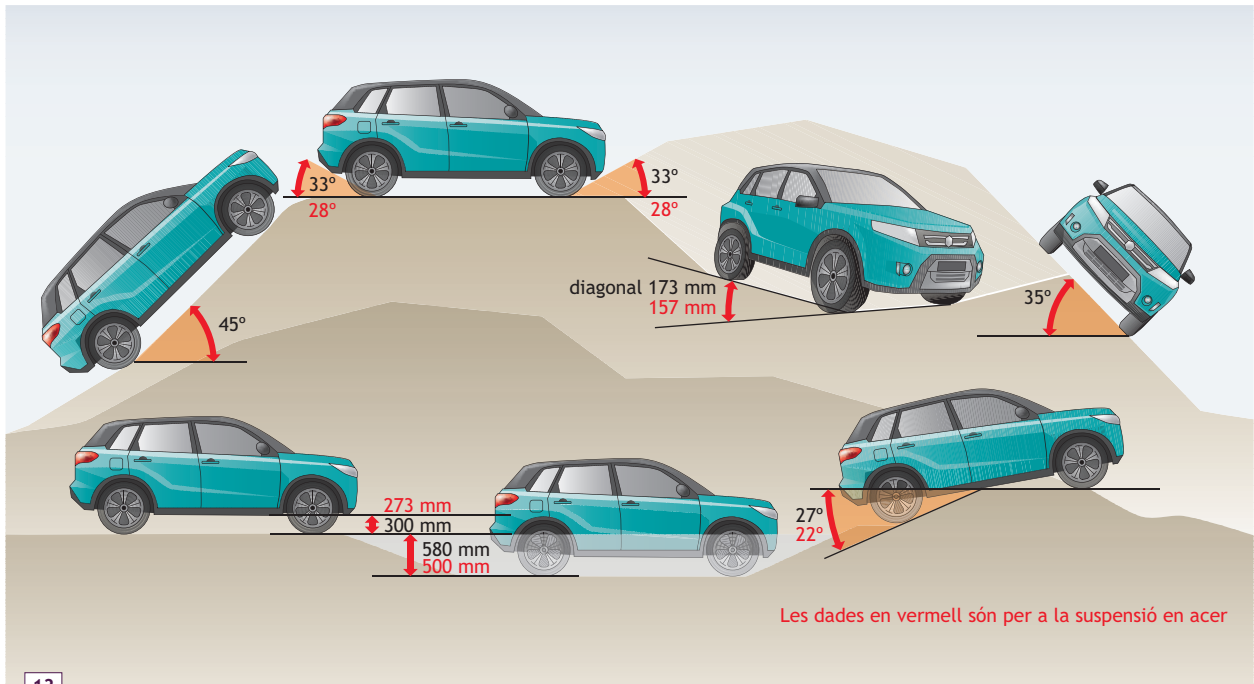
El sistema de transmissió dels vehicles està compost per una sèrie d'elements encarregats de transmetre l'energia proporcionada pel motor a les rodes per tal que aquestes produeixin el desplaçament del vehicle.

A la figura 12 s'expliquen de forma breu els elements que conformen aquest sistema i, en unitats posteriors, es tractaran més àmpliament.



Activitats finals

1.. A la imatge següent, el fabricant d'aquest vehicle ens indica una sèrie de característiques relatives a les capacitats d'ascensió màxima, capacitat de travessar rius, peralts màxims, etc.



13

Aquesta capacitat ascensional ens indica el màxim pendent que pot pujar aquest vehicle.

Les característiques del Touareg 2003 són:

- Longitud: 4754 mm.
- Amplada: 1928 mm.
- Altura: 1726 mm.
- Batalla: 2855 mm.
- Amplada de via davant: 1653 mm.
- Ample de via darrere: 1665 mm.
- Pes total admissible: 2945 kg.
- Pes en buit: 2214 kg.
- Capacitat del dipòsit: 100 l.
- Coeficient de resistència aerodinàmica: $0,38 C_x$.

Amb les dimensions aquí aportades, calcula les dades següents:

- La resistència deguda al pendent d'aquest vehicle quan va carregat amb el màxim pes permès.
- Calcula la força de fricció disponible en cada roda, suposant que es desplaça sobre asfalt uniforme.
- Dibuixa sobre el teu vehicle elegit les forces que intervenen en la dinàmica longitudinal.
- Calcula la força de resistència exercida pel vent en el desplaçament d'aquest vehicle, suposant que l'aire està en calma i que el vehicle es desplaça a una velocitat de 100 km/h. Prendre com a condicions de l'aire les normals de temperatura i pressió.
- Calcula la potència necessària per tal que aquest vehicle ascendeixi pel pendent màxim, amb una velocitat de 2 km/h i amb el vent en calma.

Autoavaluació

1. Una de les forces que intervenen en la dinàmica longitudinal del vehicle és la força...

- a) centrífuga.
- b) centrípeta.
- c) de resistència aerodinàmica.
- d) d'atracció electrostàtica.

2. El moviment de rodament de les rodes és la suma de dos moviments simultanis: un de rotació respecte del seu eix i l'altre de...

- a) rotació sobre el terreny.
- b) lliscament sobre el terreny.
- c) translació sobre el terreny.
- d) rotació angular sobre el terreny.

3. Per tal que es produeixi el gir de la roda respecte del punt de contacte intervenen dues forces. Una d'aquesta és la força...

- a) d'atracció electrostàtica.
- b) centrípeta.
- c) centrífuga.
- d) d'adherència.

4. L'acció de les dues forces aplicades a la roda crea un parell de rotació que provoca el desplaçament de la roda, amb la qual cosa apareix una força denominada d'impulsió en...

- a) la perifèria de la roda.
- b) el punt de contacte de la roda amb el terreny.
- c) el radi de la roda.
- d) l'eix de rotació de la roda.

5. Per tal que es produeixi la rotació de la roda, és necessària la força d'adherència o de fricció, la qual és proporcional a...

- a) la força tangencial.
- b) el parell de gir exercit pel sistema de transmissió.
- c) el pes del vehicle.
- d) el parell de gir produït pel motor.

6. La resistència al rodament és deguda a la deformació del pneumàtic, de la superfície sobre la qual es desplaça, o de totes dues alhora. Per tant, la resistència al rodament d'una roda del tren que gira sobre els rails és...

- a) màxima, degut al contacte de metall amb metall.
- b) menor que la d'un pneumàtic en desplaçar-se sobre l'asfalt.
- c) igual a zero, ja que tots dos elements són indeformables.
- d) major que la d'un pneumàtic en desplaçar-se sobre asfalt.

7. La resistència exercida per l'aire al desplaçament depèn de la velocitat del vehicle, i aquesta resistència és major...

- a) quan el vehicle està parat.
- b) com menor és la velocitat del vehicle.
- c) com major és la velocitat del vehicle.
- d) amb velocitats baixes del vehicle.

8. Una de les forces de resistència al desplaçament del vehicle apareix quan el vehicle puja per un pendent. Aquesta força s'aplica en...

- a) la zona de contacte del pneumàtic amb el terreny.
- b) el perímetre exterior de la roda.
- c) el centre de gravetat del vehicle.
- d) el tren de tracció del vehicle.

9. Un dels elements que formen la cadena cinemàtica de la transmissió són els semieixos o paliers, els quals s'encarreguen de...

- a) transmetre el gir des del diferencial a les rodes.
- b) transmetre el gir des del canvi de velocitats al diferencial.
- c) connectar i desconectar el gir del motor al canvi de velocitats.
- d) connectar el gir del motor al diferencial.