

### 5. EL SOROLL FERROVIARI

La principal causa del soroll provocat pel ferrocarril és la seva pròpia circulació. Donada la naturalesa d'aquesta tesina serà aquest el tipus de soroll en el que més ens centrarem. Malgrat això, existeixen altres fonts de sorolls directament relacionades amb el ferrocarril i que no són en absolut menyspreables: el manteniment de la via (treballs d'auscultació, d'esmolament dels carrils, de bastonament, de desguarniment, etc.), la renovació de la via, el manteniment i la reparació dels trens que es duu a terme en els tallers, la formació dels trens a les estacions, etc. Tenint en compte això, es poden distingir els següents tipus de soroll:

1. El soroll de la circulació dels trens.
2. El soroll del manteniment i de la renovació del material ferroviari i de la via.
3. El soroll de les instal·lacions ferroviàries.

#### 5.1. SOROLL CAUSAT PER LA CIRCULACIÓ

##### 5.1.1. Tipus de soroll de circulació

En la generació del soroll produït per la circulació d'un tren intervenen diferents factors. No sempre que circula un tren es sent el mateix tipus de soroll ja que, en funció dels principals factors generadors, es poden distingir els següents tres tipus de soroll de circulació:

- Soroll de tracció: soroll produït pels motors, sistemes de tracció i sistemes auxiliars (aspiració, escapament, refredament, etc.). Es contraresta mitjançant dispositius d'insonorització. És la font de soroll predominant a baixa velocitat.
- Soroll de rodament i fregament de les rodes: soroll produït pel contacte entre les rodes i el carril. Depèn de la rugositat del rail i de les rodes, així com de la resposta de la via i el vehicle. És el soroll predominant a les velocitats mitjanes més habituals i ve produït pels següents fenòmens:
  - imperfeccions microscòpiques, rugositats en el contacte roda – carril.
  - vibracions de les rodes amb freqüències ben determinades a partir de 1600 Hz.
  - vibracions del carril amb freqüències properes als 1000 Hz.
  - vibracions de les travesses pel seu contacte amb les subjeccions dels carrils. Correspon principalment a les baixes freqüències de 400 Hz aproximadament.
- Soroll aerodinàmic: soroll produït per la interacció del vehicle amb l'aire. Predomina quan la velocitat del vehicle és elevada i depèn fortament d'ella.

Així doncs, en funció principalment de la velocitat de circulació del tren predominarà un tipus de soroll. Fixar les velocitats de transició o canvi de font predominant en el nivell sonor total és difícil i depèn de les característiques del vehicle i de la línia ferroviària.

En general, el soroll de tracció predomina a velocitats baixes quan el tren comença la marxa. A partir d'uns 40 a 60 km/h i fins a velocitats pròpies de l'alta velocitat ( 250-320 km/h) és el soroll de rodament el que sol determinar el nivell sonor total ja que el soroll dels enginys queda tapat per aquest. Per velocitats superiors, és el soroll aerodinàmic la font sonora principal. La figura 5.1 mostra la variació del nivell de pressió sonora amb la velocitat i la contribució de cadascuna de les fonts al soroll total, en funció de la velocitat.

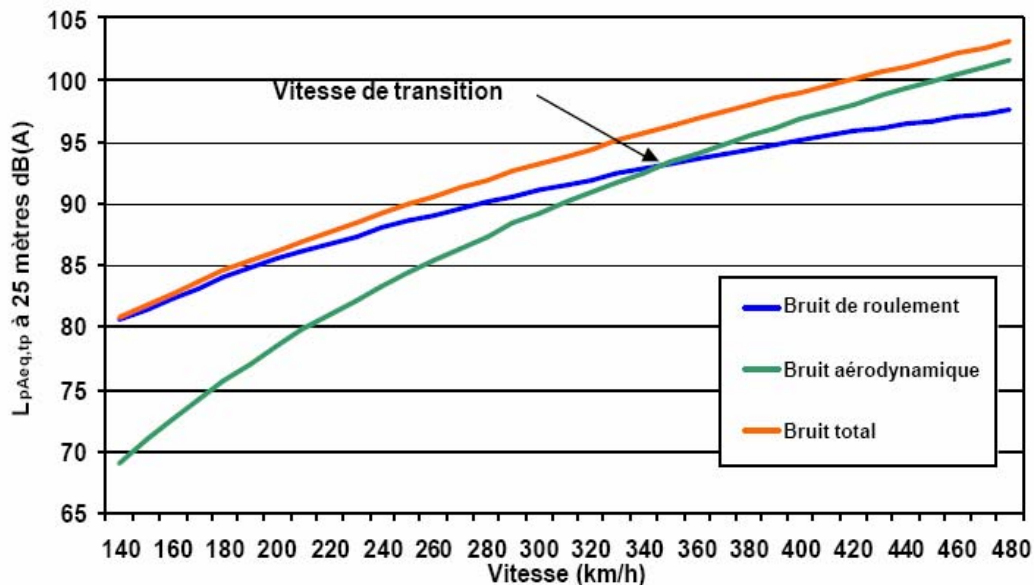


Figura 5.1 Nivell sonor total i corbes de contribució del soroll de rodament i soroll aerodinàmic en funció de la velocitat del tren (extret de [5])

Malgrat ser el factor més determinant en aquesta classificació, la velocitat no és ni molt menys l'únic que intervé. Seguidament es fa un repàs dels nombrosos factors a tenir en compte en aquest tema.

### 5.1.2. Factors que influeixen en el soroll de circulació

Com s'ha dit, la circulació és la principal causa del soroll dels trens. Per acabar d'entendre els diferents tipus de soroll de circulació i abans d'explicar les seves característiques físiques, sembla convenient fer un repàs dels diversos factors que hi intervenen. Aquests factors es poden agrupar en les següents categories:

1. via
2. infraestructura
3. velocitat
4. longitud
5. material
6. condicions de l'entorn

### 5.1.2.1. Via

La influència de les característiques de la via en l'emissió del soroll és fonamental ja que no només intervenen els seus elements sinó també la seva tipologia i les seves condicions de traçat tant en alçat com en planta.

#### Elements de la via

- Carril: És l'element més important en termes de producció de soroll donat el seu contacte directe amb les rodes dels vehicles. L'existència en la seva superfície de rugositats, ondulacions o estries poden provocar un mal contacte entre ambdós elements i suposar increments dels nivells sonors de fins a 15 dBA.
- Travesses: com a responsables de transmetre les tensions provocades pel tren del carril al balast, també juguen un paper rellevant. S'ha comprovat que les de fusta, de menor rigidesa que les de formigó, esmorteïxen millor les vibracions i, per tant, aconseguen vies menys sorolloses.
- Subjeccions: El tipus de sujeccions, i més concretament la seva elasticitat, intervenen també en la transmissió de vibracions de tot tipus i, en concret, en la transmissió de sorolls.
- Balast: Les propietats esmorteïdores del balast depenen del seu gruix i de la seva granulometria. A una major heterogeneïtat de la granulometria del balast (respectant certs límits) s'obtenen unes millors característiques esmorteïdores.
- Aparells de via: Els aparells de via com poden ser desviaments, travessies, o aparells de dilatació suposen discontinuïtats a la via i, per tant, són font d'increments de soroll. Aquests increments poden ser considerables tant per la seva magnitud com pel fet de produir-se generalment en entorns urbans.

#### Tipus de via

Dins de la via convencional (amb balast) podem distingir la via amb juntes i la via amb barra llarga soldada. Lògicament, la via amb juntes és bastant més sorollosa, ja que al soroll normal de la circulació s'uneix el soroll degut al copejament de les rodes amb les juntes. Les diferències de nivell sonor són de l'ordre de 5 a 6 dBA.

L'estat de conservació de la via influeix també en l'emissió de sorolls. La presència de travesses mal assentades, defectes d'anivellació o alineació, etc., donen lloc a increments de soroll.

Enfront a la via convencional, els diferents tipus de vies sobre llosa de formigó (sense balast) provoquen increments de soroll respecte a la via convencional de l'ordre de 2 a 4 dBA.

### **Traçat**

En alçat, la presència de fortes rampes afavoreix un major nombre de frenades amb el conseqüent augment del soroll. A més a més, les frenades poden originar defectes sobre els carrils i les rodes que provocaran un mal contacte entre ambdós elements, provocant encara més soroll.

En planta, l'existència de corbes de radi reduït, situació que pot succeir fàcilment en zona urbana, provoca un increment de soroll degut al fregament entre la pestanya de la roda i el carril. En aquest fregament tant influeix el radi de la corba i la velocitat del tren com el tipus i nombre de vehicles de la composició que circula. Les molèsties que provoca el soroll de fregament es veuen agreujades pel fet de tractar-se d'un so amb un espectre compost per tons d'alta freqüència força penetrants.

Com a mesura més habitual per solucionar aquest tipus de problema, es solen utilitzar engreixadors de carril i de pestanyes que, a més, contribueixen a reduir el desgast del carril.

### **5.1.2.2. Infraestructura**

La infraestructura (terraplè, desmunt, pont o túnel) sobre la qual discorre la via actua sobre els nivells sonors i la seva transmissió.

#### **Via en terraplè**

L'elevació del tren respecte al seu entorn produeix una zona d'ombra acústica i l'esmoreïment del soroll ve amb la distància. Es pot observar que a uns 25 metres de la via es perceben nivells lleugerament superiors que en el cas de via a nivell. A partir dels 50 metres els nivells sonors tornen a ser els mateixos en ambdues tipologies. La millora acústica de l'esmentada zona d'ombra és relativa ja que la zona protegida és bastant reduïda i molt poc aprofitable per habitatges o instal·lacions urbanes.

La tesina, a efectes de valorar el soroll que provoquen el trens, assimilarà aquest tipus de secció a un terreny pla, per ser el més favorable a la propagació del soroll i el que té més en compte la possible població afectada.

#### **Via en desmunt**

El seu comportament enfront al soroll és clarament favorable, ja que els talussos del desmunt absorbeixen gran part del soroll, actuant com si fossin pantalles antisoroll. La via en desmunt disminueix el nivell sonor entre 5 i 15 dBA respecte la via a nivell.

#### **Via en pont**

Els ponts de formigó amb balast produeixen un increment lleu del soroll, mentre que els ponts de formigó sense balast (via en llosa) són més sorollosos produint increments de l'ordre de 3 dBA.

Malgrat això, els pitjors tipus de ponts en termes de contaminació acústica són els metàl·lics sense balast. Aquests ponts provoquen augments de l'ordre de 10 dBA respecte al terreny pla.

### Via en túnel

En la gran majoria dels casos, la ubicació de la via en túnel suposa una protecció òptima respecte el soroll, donat que el gruix de les parets del túnel sol ser suficient per eliminar el soroll percebut per les persones fora del túnel. Tot i així, en algunes situacions pot resultar necessari prendre mesures especials en funció del tipus i humitat de sòl que forma les parets del túnel. La presència d'aigua permet una major transmissió del soroll (augments de fins a 10 dBA). Els sòls relativament durs, compactes i poc permeables també transmeten millor els sons i les vibracions. Per altra banda, les boques dels túnels amplien el soroll en 5-6 dBA.

Lògicament, també es pot arribar a percebre el soroll d'un tren a través d'un túnel per un insuficient gruix de les parets o per l'existència de canalitzacions, conduccions de serveis, ancoratges o elements de cementació. Aquest soroll es caracteritza per una presència majoritària de baixes freqüències, donant lloc a un característic rumor de rodatge. En els àmbits urbans també es transmeten vibracions que es poden arribar a sentir als habitatges.

Tot i que s'analitza el soroll que provoca el ferrocarril a terceres persones, com ja s'ha dit anteriorment, s'ha de destacar que dins del túnel els viatgers i el personal del tren estan exposats a increments considerables del nivell sonor. Generalment, aquest problema es resol amb una construcció adequada dels vehicles o prenent certes mesures constructives com plaques absorbents a les parets del túnel o revestiments especials del sòl, solucions adoptades també en la construcció d'estacions subterrànies.

#### 5.1.2.3. Velocitat

El soroll de la circulació del tren varia de forma considerable amb la velocitat. Per a un mateix tipus de material, via i infraestructura, el soroll augmenta a mida que s'incrementa la velocitat de circulació. Com s'ha vist anteriorment, és la velocitat el factor més decisiu a l'hora d'identificar el tipus de soroll de circulació que predomina en cada moment: de tracció, de rodament o aerodinàmic.

L'efecte de la velocitat es pot quantificar mitjançant diverses fórmules. Aquí es presenta la següent expressió general, bastant acceptada per organismes internacionals:

$$L_v = L_{v_0} + n \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (5.1)$$

on:  $L_v$  = nivell acústic a la velocitat  $v$   
 $L_{v_0}$  = nivell acústic a una certa velocitat de referència  
 $n$  = constant

A partir d'aquesta expressió, cada institució o centre d'estudis calibra els diferents valors de la fórmula segons les hipòtesis i condicionants corresponents al seu àmbit i objecte d'estudi. Per exemple, en cadascun dels tres tipus de soroll de circulació que s'han explicat en l'apartat anterior, la constant "n" pren uns determinats valors:

- Soroll de tracció: la seva dependència amb la velocitat és baixa, entre  $0-20 \log(v)$ .
- Soroll de rodament: la seva dependència amb la velocitat del vehicle varia entre  $20-30 \log(v)$ .
- Soroll aerodinàmic: depèn fortament de la velocitat, amb una relació aproximada de  $50-70 \log(v)$ .

### 5.1.2.4. Longitud

L'emissió de soroll depèn de la longitud total del tren (locomotora + vagons). A igualtat de la resta de factors, a l'augmentar la longitud del tren augmenta el soroll, tant pel que fa referència al nivell sonor puntual ( $L_{Amàx}$ ) com al nivell sonor equivalent ( $L_{Aeq}$ ), ja que la duració de pas del tren és major.

### 5.1.2.5. Material

Les característiques del material són un altre factor bàsic en la intensitat del soroll produït pel trànsit ferroviari ja que el material és una de les fonts emissores de soroll (conjuntament amb la interacció de la roda i el carril).

#### Motor

El material motor pot ser de dues classes: diesel o elèctric. Hi ha una gran diferència en el soroll que emet el motor segons si es tracta d'un material o l'altre. El motor diesel és bastant més sorollós que el motor elèctric.

El tipus de motor també és determinant a l'hora de distingir quin dels tres tipus de soroll de circulació es té. En un tren amb màquina elèctrica i amb velocitats baixes predomina el soroll de rodament i fregament de les rodes, ja que la màquina elèctrica és completament silenciosa quan la locomotora està parada i al moure's només produeixen soroll els ventiladors de refredament. En canvi, un tren diesel s'ajusta millor al canvi de font predominant comentat anteriorment; en funció del tipus de locomotora diesel, la velocitat de transició de soroll de tracció a soroll de rodament pot variar, però sempre són velocitats inferiors als 100 km/h.

#### Vagons

Dins de tota la tipologia de vagons, la classificació més general és distingir entre vagons de viatgers i vagons de mercaderies. De tots dos, els trens de mercaderies són els que provoquen un nivell sonor més elevat. A més, el fet de circular amb els vagons de mercaderies buits accentua el soroll produït, ja que els laterals del cos del vehicle vibren; quan el vagó circula ple, la càrrega té un efecte esmorteïdor sobre els laterals.

## Rodes

La seva importància i l'efecte de les nombroses imperfeccions són anàlegs als ja explicats en el cas dels carrils.

## Frens

El soroll que produeixen els frens quan aquests actuen depèn de la seva tipologia: frens de sabata o frens de disc. Una frenada amb frens de sabata augmenta el soroll del tren en 8 dBA mentre que amb frens de disc augmenta 2 dBA. A més, s'ha de tenir en compte que els frens de disc mantenen molt millor l'estat de les rodes, amb la conseqüent acció favorable sobre el soroll produït per la interacció entre la roda i el carril.

### 5.1.2.6. Condicions de l'entorn

A part de l'evident esmorteïment del soroll degut a la distància, les característiques del terreny que travessa la línia juntament amb el seu estat d'humitat també influeixen en la transmissió del so cap al seu entorn. Tampoc és menyspreable l'efecte del vent com s'ha explicat en capítols anteriors.

Un altre factor a considerar especialment en entorns urbans és la presència d'edificis. En general ens podem trobar davant de dues situacions, edificis en U i en L. En el primer cas hi ha edificis als dos costats molt propers i les múltiples reflexions que es produeixen a les seves superfícies donen com a resultat que el nivell d'immissió sigui pràcticament constant amb l'alçada, facilitant el càlcul. El segon cas, amb edificis només a un costat, és força més complicat ja que el nivell sonor rebut a les superfícies dels habitatges sí varia amb l'alçada.

Com a resum d'aquest apartat, es mostra en la següent taula l'efecte en el nivell sonor d'alguns dels factors que s'acaben de comentar. Les dades que es mostren són l'augment en decibels A sobre el valor previst per una via soldada en bon estat de conservació.

Modificació		Efecte
Ondulacions del carril		Fins a +15 dBA
Via amb juntes		Fins a +6 dBA
Subjeccions elàstiques		Fins a -8 dBA
Via sobre llosa de formigó		Fins a +4 dBA
Ponts formigó		Fins a +3 dBA
Ponts d'acer sense balast		Fins a +10 dBA
Tipus de frens	de disc	Fins a +2dBA
	de sabates	Fins a +8dBA
Capes elàstiques sub-balast		Fins a +10 dBA
Faldons laterals als vehicles		Fins a -2 dBA
Esmorteïdors a les rodes		Fins a -5 dBA
Via en trinxera		Fins a -15 dBA

Taula 5.1 Efecte de diferents factors sobre el nivell sonor (extret de [6])

### 5.1.3. Característiques físiques del soroll de circulació ferroviària

El soroll ferroviari és un fenomen essencialment fluctuant i amb una signatura temporal regular. A diferència d'altres casos, la font es troba ben localitzada a l'espai i, a més a més, es caracteritza per l'estabilitat de l'emissió (en nivell i signatura acústica) i per una gran discontinuïtat d'aparició del soroll.

A diferència del trànsit per carretera, on cada vehicle pot ser considerat com una font puntual omnidireccional degut a la seva reduïda dimensió dins del marc de l'estudi del soroll, un tren és una font sonora complexa que es comporta com varies fonts sonores aïllades. El soroll emès pels bogis i els eixos no es pot estudiar de manera omnidireccional, ja que la base de la caixa constitueix una pantalla a la propagació del soroll. A la pràctica, es considera que el conjunt bogi - eix es comporta com un dipol acústic i que aquest emet les ones sonores dins d'un volum conoïdal que presenta un angle d'obertura d'aproximadament  $60^\circ$  en el vèrtex.

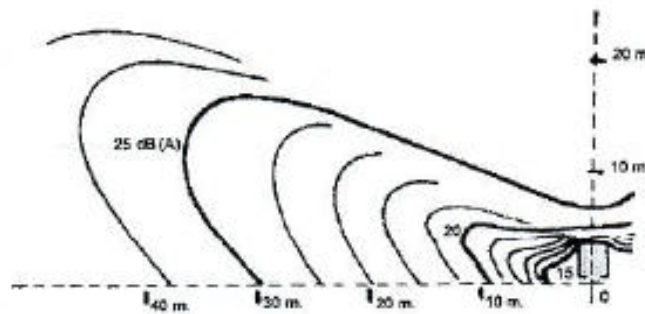


Figura 5.2 Atenuació suplementària deguda a l'apantallament de la caixa (extret de [7])

Com es pot veure a la figura 5.2, en un pla vertical perpendicular a l'eix del tren es produeix, per a angles superiors a  $30^\circ$  sobre la horitzontal, una atenuació suplementària deguda a l'apantallament de la caixa. Aquest fenomen segueix una llei lineal i es coneix amb el nom de directivitat.

Les fonts sonores ferroviàries presenten també una directivitat en el pla horitzontal que, a diferència del pla vertical, es regeix per una llei no lineal.

En general, les fonts de soroll dels sistemes ferroviaris es descriuen en termes de nivells de pressió sonora a una distància fixa de les vies i a una altura fixa sobre el sòl. Si es mesura el nivell sonor al pas d'un tren en funció del temps, el que es troba és un augment sobtat inicial, seguit d'un tram relativament constant i finalment una disminució ràpida semblant a la manera en que s'ha iniciat el soroll. És a dir, la signatura o marca sonora d'un tren es pot assimilar a un tossal. Segons el tipus de composició ferroviària, la gràfica pot presentar un màxim a la zona inicial del tram constant o no. En el cas d'un tren propulsat per una locomotora, la corba presenta un màxim inicial que correspon al pas de la locomotora (veure figura 5.3). En trens formats per vagons autopropulsats i en



trens d'alta velocitat no hi ha cap màxim inicial, ja que en aquests tipus de trens el soroll de rodament i fregament entre rodes i carrils o el soroll aerodinàmic supera al soroll de tracció.

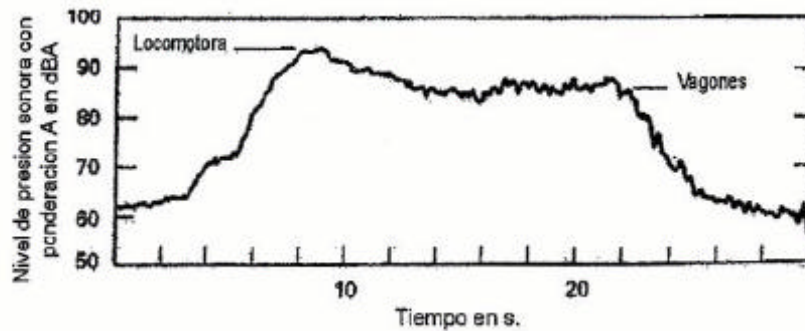


Figura 5.3 Gràfica temporal del nivell de pressió sonora durant el pas d'un tren de viatgers (extret de [6])

Per tant el soroll ferroviari, a diferència del trànsit rodat que es pot ajustar més o menys a una distribució normal de Gauss, té un caràcter més aviat bimodal: soroll mentre passa el tren i tranquil·litat i silenci durant la resta del temps.

Com ja hem dit anteriorment, la causa dominant dels sorolls provocats pels trens en la major part de l'escala de velocitats de circulació recau en la interacció entre les rodes i els carrils (soroll de rodament). En conseqüència, a una velocitat donada, la dispersió de les dades sobre el soroll de trens dependrà en gran part del tipus i condicions de rodes i rails.

La rugositat de les rodes i dels rails es deu en molts casos al propi ús. Si existeixen zones planes a les rodes o discontinuïtats a la superfície del rail, el soroll per fregament consisteix en una successió d'impactes de banda ampla. Aquests impactes es poden evitar amb un bon disseny i manteniment de les vies i trens.

En referència a l'espectre, els trens europeus mostren un canvi cap a les altes freqüències a mida que augmenta la seva velocitat, a diferència dels vagons americans, que no ofereixen canvis rellevants en la forma de l'espectre del soroll amb les variacions de velocitat.

## 5.2. SOROLL CAUSAT PEL MANTENIMENT I RENOVACIÓ DE LA VIA

Degut a la circulació dels trens, la via està sotmesa a sol·licitacions que provoquen una pèrdua de la seva qualitat geomètrica. Per aquest motiu cal mesurar l'evolució de la qualitat de la via i quan sigui necessari realitzar els pertinents treballs de manteniment.

La qualitat geomètrica de la via està definida mitjançant diversos paràmetres: ample de via, alineació, anivellació longitudinal, anivellació transversal, guerxament, etc. La mesura d'aquests paràmetres s'anomena auscultació i es realitza mitjançant vehicles que poden ser de diversos tipus (remolcats o autopropulsats) anomenats vehicles d'auscultació. N'hi ha dos tipus:

- Auscultació geomètrica: mesura directament els paràmetres geomètrics de la via (anivellament, alineació, ample de via, guerxament). Habitualment es fa un cop l'any, tant en línies convencionals com en línies d'alta velocitat, i s'ha de fer a velocitats relativament baixes, tot i que les noves tècniques permeten arribar fins als 200 km/h.
- Auscultació dinàmica: mesura acceleracions en diferents punts d'un vehicle laboratori (acceleracions als eixos, als bogis i a la caixa del vehicle). Habitualment es fa cada tres setmanes i normalment només a les línies d'alta velocitat. Es pot fer a velocitat comercial (300 km/h en el cas de les línies d'alta velocitat) i dins de l'horari comercial, acoblant un cotxe laboratori a una unitat AVE.

El període i tipus d'auscultació depèn de la intensitat del trànsit i de la velocitat de circulació dels trens.

Segons els resultats obtinguts en l'auscultació, serà necessari corregir els defectes de la via, ja sigui mitjançant un esmolament del carril o un bastonament i estabilització de la via.

Si els defectes mesurats són causa només de defectes en la superfície del carril, produïts per exemple pel trencament de balast que hi havia sobre el carril quan ha passat el tren, és suficient realitzar un esmolament del carril.

Si el defecte no és conseqüència de la superfície del carril serà necessari bastonar, que consisteix en realitzar operacions d'alineació i anivellament mitjançant unes màquines de manteniment que agafen el carril amb unes ungles i el col·loquen a la seva posició correcta. En moure la via, cal compactar novament el balast que es troba per sota de les travesses, per tal que aquestes es recolzin adientment. La màquina que realitza aquest procés s'anomena bastonadora i n'hi ha de diferents tipus en funció del seu rendiment i si serveixen per bastonar via general o desviaments.

D'altra banda, el bastonament ocasiona una pèrdua de la resistència lateral de la via. Per tal d'evitar aquesta situació i, conseqüentment, haver de reduir la velocitat de circulació, es realitzen unes operacions d'estabilització sotmetent la via a vibracions laterals i pressió vertical a la vegada. La màquina que realitza aquesta funció s'anomena estabilitzador dinàmic.

Aquestes tasques s'han de realitzar fora del servei comercial de la línia per tal de no interferir en la marxa dels trens. A part d'esmolat els carrils, bastonar i estabilitzar la via, hi ha altres tasques de manteniment: canvi de travesses trencades, aportació de balast, reperfilatge de la banqueteta, etc.



Figura 5.4 Vagó tremuja per al transport de balast (extret de [8])

Tot i el manteniment de les vies que es duu a terme, arriba un moment en el que és necessari renovar la via. Aquesta renovació pot ser de dos tipus: renovació parcial, si únicament es canvia un dels elements que conformen la via, i renovació total, si es canvia tot. Cal esmentar que la vida útil del balast, en termes mitjos, és la meitat de la vida útil dels carrils i les travesses. Els intervals de temps entre renovacions depenen del trànsit de la línia; l'experiència dona, però, com a referència que el balast té una vida útil compresa entre 15 i 20 anys. Per retirar el balast de la via s'utilitza una màquina que s'anomena desguarnidora, mentre que la renovació total de la via es realitza mitjançant un tren de renovació.

Evidentment totes aquestes feines impliquen la creació de soroll, tant per la feina en si com pel pas dels diferents tipus de maquinària: vehicles d'auscultació, bastonadores, estabilitzadors dinàmics, trens de renovació, desguarnidores, perfiladores, etc.

### 5.3. EL SOROLL DE LES INSTAL·LACIONS FERROVIÀRIES

Les instal·lacions ferroviàries inclouen els tallers i les estacions. En ambdues es produeixen sorolls de diferent naturalesa i intensitat que poden ocasionar molèsties serioses a les persones de l'entorn.

En el cas de les estacions és imprescindible que aquestes estiguin molt pròximes als nuclis urbans i, per tant, no es pot canviar la seva ubicació. L'objectiu ha de ser minimitzar el soroll que s'hi produeix. En canvi, els tallers no cal que estiguin tan propers a la població i, per tant, es poden situar el més allunyats possible per evitar problemes de soroll. La seva ubicació respondrà més a criteris logístics i d'exploació.

Els sorolls de les instal·lacions ferroviàries són originats pels següents equips i operacions: Pòrtics, grues, cabrestants, botzines, clàxons, xiulets, sirenes, moviment de cotxes de viatgers i vagons per a la composició de trens, reparacions de vagons, locomotores estacionàries i tractors de maniobra.