

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI ARHITECTURĂ

Ing. Petru CARA

**TEZA DE DOCTORAT**

CONUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

Prof. dr. ing. Ion COSTESCU

UNIV. „POLITEHNICA” TIMIȘOARA BIBLIOTECA CENTRALĂ	
Nr. volum	578700
Dulap	369 Lit. 1

TIMIȘOARA

2005

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI ARHITECTURĂ

Ing. Petru CARA

## **TEZA DE DOCTORAT**

**CONTRIBUȚII LA STUDIUL ÎMBUNĂȚĂȚIRII  
CONFORTULUI INFRASTRUCTURII TRANSPORTURILOR  
URBANE ȘI INTERURBANE**

CONUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

Prof. dr. ing. Ion COSTESCU

TIMIȘOARA

2005

# PREFAȚĂ

Calea ferată, împreună cu celelalte căi de transport, trebuie să asigure transportul călătorilor și a mărfurilor în condiții de siguranță deplină, de confort sporit și eficiență economică.

Calea ferată se află într-o interacțiune foarte puternică cu factori agresivi, ce mai important fiind materialul rulant. De aici rezultă întreaga concepție de proiectare și construcție a căii, astfel încât să fie asigurată mentenabilitatea acesteia, adică posibilitatea de a interveni rapid și eficient, astfel încât să nu fie compromise condițiile de siguranță și confort.

În fața administrațiilor feroviare din majoritatea țărilor europene (și nu numai) stau o serie de sarcini care trebuie îndeplinite:

- sporirea condițiilor de confort;
- sporirea duratei de exploatare a căii;
- sporirea sarcinii pe osie;
- diminuarea volumului și costului lucrărilor de întreținere;
- o mai bună protecție a mediului (scăderea poluării fonice, a vibrațiilor transmise construcțiilor și instalațiilor învecinate căii etc.);
- sporirea vitezei maxime atât pe trasee existente, cât și realizarea de trasee noi pentru viteze mari;
- realizarea căii fără joante și înglobarea în cale a aparatelor de cale sudate.

În contextul acestor preocupări, teza de doctorat prezintă principalele rezultate obținute de autor atât în urma experienței acumulate de peste 13 ani la Regionala de Căi Ferate Timișoara, respectiv peste 14 ani pentru căile ferate germane, cât și în urma studiilor și cercetărilor efectuate pe liniile ferate, în laboratoare și biblioteci în ultimii 6 ani.

Lucrarea cuprinde 6 capitole, și anume:

Cap. I. Noțiuni generale

Cap. II. Geometria căii

Cap. III. Racordări cinetice

Cap. IV. Suprastructura căii ferate

Cap. V. Toleranțe de confort în exploatare

Cap. VI. Concluzii generale, aplicabilitatea și valorificarea rezultatelor  
obținute

Teza de doctorat a fost elaborată sub îndrumarea directă a domnului prof. dr. ing. Ion COSTESCU. Recomandările și observațiile făcute de conducătorul științific, atât în cadrul pregătirii profesionale prin doctorat al autorului cât și pe toată durata tezei de doctorat, au constituit un ajutor neprețuit. Pentru sprijinul permanent și îndrumările pe care le-am primit pe tot parcursul pregătirii și elaborării tezei de doctorat, îmi exprim profunda mea recunoștință conducătorului științific, prof. dr. ing. Ion COSTESCU.

Mulțumesc domnului conf. dr. ing. Alexandru HERMAN, pentru îndrumările și sfaturile pe care mi le-a dat pe toată durata elaborării tezei de doctorat, precum și pentru încurajările permanente care mi-au fost deosebit de utile.

Mulțumesc cu afecțiune foștilor mei profesori de căi ferate ing. Partenie STOIAN și prof. dr. ing. Vasile IZDRĂILĂ, care m-au introdus în tainele căii ferate.

Mulțumesc prietenului ing. Walter BERBERICH pentru ajutorul acordat la elaborarea prezentei lucrări.

Mulțumesc conducerii Universității „Politehnica” din Timișoara, Facultății de Construcții și Arhitectură și Departamentului de Inginerie Geotehnică și Căi de Comunicație Terestre pentru tot sprijinul acordat la pregătirea și susținerea examenelor, a referatelor și a prezentei lucrări.

Autorul

## CAP. I. NOȚIUNI GENERALE

Rețeaua de cale ferată, în fiecare țară, are densitatea mult mai mică decât rețeaua de drumuri. Statisticile europene arată că lungimea rețelei feroviare reprezintă cca 7 % din lungimea rețelei de drumuri publice.

**Tabelul 1.1**

Nr. crt.	Țara	Raportul rețea feroviară: rețea de drumuri publice [%]	Densitatea rețelei feroviare	
			m/km <sup>2</sup>	m/1 000 locuitori
1.	România	15,7	48	500
2.	Belgia	21,6	113	340
3.	Germania	18,0	114	510
4.	Austria	17,7	67	710
5.	Cehia	17,6	102	840
6.	Ungaria	26,1	84	760
7.	Ucraina	13,3	37	430
8.	Lituania	11,7	37	920
9.	Moldova	13,2	39	305
10.	Polonia	11,8	81	660
11.	Bulgaria	11,6	39	510
12.	Suedia	10,1	22	1 133
13.	Croația	9,8	47	552
14.	Letonia	9,5	30	530
15.	Slovenia	8,1	59	600
16.	Grecia	8,5	19	250
17.	Finlanda	7,7	17	1 160
18.	Estonia	6,9	23	650
19.	Portugalia	5,9	33	290
20.	Luxemburg	5,4	106	750
21.	Italia	5,3	53	290
22.	Bielorusia	5,2	26	530
23.	Anglia	4,6	68	290
24.	Elveția	4,6	78	470
25.	Norvegia	4,5	12	950
26.	Franța	4,1	60	570
27.	Spania	3,9	26	330
28.	Albania	3,7	23	210
29.	Danemarca	3,3	54	460
30.	Olanda	2,3	66	180
31.	Irlanda	2,1	28	550
32.	<b>MEDIA</b>	<b>7,3</b>	<b>47</b>	<b>480</b>

În tabelul 1.1 sunt prezentate câteva date statistice privind ponderea liniilor de cale ferată în raport cu drumurile publice respectiv densitatea rețelei feroviare în câteva țări europene.

Se observă că față de valorile medii de 48 m/km<sup>2</sup> și 480 m/1 000 locuitori, cele mai mari valori se regăsesc în Germania (114 m/km<sup>2</sup>) și în Finlanda (1 160m/1 000 locuitori) iar cele mai mici valori se regăsesc în Norvegia (12 m/km<sup>2</sup>) și în Olanda (180 m/1 000 locuitori), deci diferențele dintre valorile maxime și minime sunt importante.

Trebuie menționat că datele statistice privind densitatea rețelei feroviare nu arată gradul de utilizare a rețelei. În acest sens se poate observa că în ultimii 10...15 ani volumul de mărfuri transportate pe calea ferată a scăzut de cca 2 ori, aceeași tendință apărând și la transporturile de călători, unde scăderea este de cca 50 %. Tendința de scădere a rolului transporturilor feroviare este cauzată în primul rând de regresul economic din țările foste comuniste (Albania, Bulgaria, Croația, Cehia, Polonia, România, Slovenia, Slovacia, Ungaria) și implicit, scăderea producției de mărfuri transportate pe calea ferată.

În tabelul 1.2 sunt prezentate câteva date statistice privind gradul de utilizare a rețelelor feroviare europene: tren km, călători km și tone km în raport cu populația țării respectiv în raport cu lungimea rețelei feroviare.

Datele din tabelul 1.2 arată atât activitatea prezentă în transporturile feroviare europene cât și sarcinile de viitor pentru administrațiile feroviare pentru a reimpulsiona acest segment al transporturilor de mărfuri și de călători.

Productivitatea în transporturile feroviare este prezentată în tabelul 1.3, unde sunt date privind raporturile personal angajat/km linie de cale ferată și personal angajat/tren km respectiv ponderea rețelei electrificate în rețeaua totală.

**Tabelul 1.2**

Nr. crt.	Țara	10 <sup>3</sup>			10 <sup>3</sup>		
		Trenuri	Călători	Tone	Trenuri	Călători	Tone
		km/nr. locuitori			km/lungime rețea		
1.	România	5,4	370	1 070	11	780	2 120
2.	Belgia	9,3	680	800	27	1 980	2 360
3.	Germania	8,2	690	870	21	1 360	1 700
4.	Austria	17,5	1 210	1 470	25	1 710	2 070
5.	Cehia	14,5	1 080	2 820	17	1 290	3 360
6.	Ungaria	9,3	670	1 250	12	880	950
7.	Ucraina	8,2	1 460	6 470	19	3 370	14 920
8.	Lituania	8,4	1 400	3 880	9	1 520	2 410
9.	Moldova	2,7	390	1 810	9	1 290	5 920
10.	Polonia	7,5	850	1 480	11	1 290	2 260
11.	Bulgaria	5,5	640	920	11	1 260	1 810
12.	Suedia	10,9	600	2 190	10	530	1 940
13.	Croația	3,6	200	370	7	370	660
14.	Letonia	8,2	730	3 020	15	1 370	5 660
15.	Slovenia	8,7	270	1 290	14	460	2 140
16.	Grecia	-	200	60	-	800	230
17.	Finlanda	7,9	600	1 550	7	520	1 340
18.	Estonia	9,1	610	2 340	14	940	3 580
19.	Portugalia	4,1	540	170	14	1 860	580
20.	Luxemburg	19,2	560	1 500	27	800	2 130
21.	Italia	5,6	860	360	20	3 000	1 250
22.	Bielorusia	8,2	1 740	5 450	16	3 280	10 280
23.	Anglia	7,3	550	270	25	1 920	940
24.	Elveția	17,6	1 700	1 100	38	3 660	2 370
25.	Norvegia	8,0	540	540	9	570	570
26.	Franța	8,5	1 100	870	15	1 910	1 510
27.	Spania	4,6	420	230	14	1 250	690
28.	Albania	0,2	60	20	1	280	90
29.	Danemarca	11,3	890	360	25	1 960	800
30.	Olanda	8,2	1 020	180	45	5 580	1 000
31.	Irlanda	3,9	350	180	7	630	330
32.	<b>MEDIA</b>	<b>8,0</b>	<b>850</b>	<b>1 440</b>	<b>17</b>	<b>1 780</b>	<b>3 030</b>

Tabelele 1.1...1.3 arată clar că există mari diferențe între administrațiile feroviare europene în ceea ce privește volumul și calitatea transporturilor feroviare. Din aceste motive UIC a recomandat administrațiilor feroviare europene să-și unească forțele pentru a rezolva următoarele probleme majore:

- oprirea scăderii continue a importanței transporturilor feroviare în raport cu celelalte sisteme de transport, în special rutier;
- ponderea transporturilor feroviare trebuie sporită în contextul creșterii volumului total de transport.

**Tabelul 1.3**

Nr. Crt	Țara	Personal angajat pe		Ponderea rețelei electrificate[%]
		Km linie cf	Km tren · 10 <sup>3</sup>	
1.	România	17	1,6	33
2.	Belgia	13	0,5	67
3.	Germania	10	0,5	40
4.	Austria	12	0,5	58
5.	Cehia	14	0,8	30
6.	Ungaria	13	1,0	30
7.	Ucraina	30	1,6	37
8.	Lituania	10	1,1	11
9.	Moldova	17	1,9	0
10.	Polonia	11	1,0	46
11.	Bulgaria	13	1,2	62
12.	Suedia	3	0,3	74
13.	Croația	10	1,7	44
14.	Letonia	9	0,6	6
15.	Slovenia	11	0,7	42
16.	Grecia	5	-	0
17.	Finlanda	3	0,5	28
18.	Estonia	8	0,6	13
19.	Portugalia	7	0,5	15
20.	Luxemburg	13	0,5	80
21.	Italia	10	0,5	62
22.	Bielorusia	15	1,0	16
23.	Anglia	8	0,3	30
24.	Elveția	12	0,3	100
25.	Norvegia	3	0,4	60
26.	Franța	6	0,4	40
27.	Spania	4	0,3	53
28.	Albania	7	7,8	0
29.	Danemarca	9	0,3	12
30.	Olanda	10	0,2	72
31.	Irlanda	3	0,4	2
32.	<b>MEDIA</b>	<b>11</b>	<b>0,7</b>	<b>41</b>



# 1. Viitorul transporturilor feroviare în sistemul de transport european

În primul rând trebuie dezvoltat sistemul de transport intermodal pe piața transporturilor europene, astfel încât toate sistemele de transport existente să fie cointeresate.

Rezultă că fiecare sistem de transport trebuie să privească spre celelalte ca fiind sisteme complementare nu numai concurente. Trebuie găsite puncte comune, convergente, trebuie exploatate punctele forte ale fiecăruia. Calea ferată azi este interesată în dezvoltarea unui sistem de transport internațional în care pune la dispoziția celor interesați capacitatea proprie de transport și este pregătită să reducă semnificativ duratele de parcurs.

Astfel, în transporturile de călători, calea ferată poate concura transporturile aeriene pe distanțe de 400... 1 000 km. Pentru aceasta trebuie rezolvată joncțiunea căilor ferate cu aeroporturile.

În transporturile de călători calea ferată poate concura transporturile rutiere în:

- participare la transportul urban și extraurban (avantaje: costuri, durata de transport, frecvența curselor, nu necesită parcări);
- transportul de călători pe distanțe de peste 200 km;

În transporturile de mărfuri avantajele căii ferate apar pe distanțe de peste 300 km, dar poate fi avantajoasă colaborarea cu transportul rutier de mărfuri și pe distanțe mari ( $\geq 500$  km) prin combinarea celor două sisteme de transport (transport RO-LA)

Pentru a câștiga teren pe piața transporturilor, calea ferată trebuie să rezolve o problemă dificilă: trecerea liberă peste granițele naționale.

În prezent administrațiile feroviare naționale nu au un sistem unitar în ceea ce privește gabaritul, ecartamentul, sarcina maximă admisă pe osie, caracteristicile infrastructurii, sistemul de alimentare cu energie electrică, instalații de siguranță etc., totodată apar o serie de dificultăți în corelarea legislațiilor în domeniul transporturilor.

Prin recomandările date, UIC caută să asigure dezvoltarea armonioasă a transporturilor feroviare. Comisia Economică Europeană a propus (în 1985) iar Organizația Națiunilor Unite a aprobat (în 1989) un acord privind marile linii feroviare internaționale (AGC – ACCORD EUROPÉEN SUR LES GRANDES LIGNES INTERNATIONALES DE CHEMINS DE FER).

Țările semnatare s-au angajat să-și dezvolte propriile rețele feroviare în spiritul acordului AGC și în funcție de posibilitățile materiale și financiare ale fiecăruia.

În acordul AGC este prezentată o rețea de linii principale și secundare pe care se desfășoară sau urmează a se desfășura transport feroviar internațional. Liniile principale sunt pe acele „culoare de transport” pe care în 1985 traficul feroviar a fost foarte dezvoltat iar liniile secundare sunt acelea pe care traficul internațional important de mărfuri și de călători se va desfășura într-un viitor mai apropiat sau mai îndepărtat.

Pentru a asigura o exploatare unitară a rețelelor feroviare, Uniunea Europeană a solicitat reabilitarea căilor ferate, astfel încât acestea să ajungă la un nivel minim acceptat pentru transportul internațional. S-a avut în vedere că realizarea acestui deziderat nu este întotdeauna posibil, în special din cauza unor considerente privind geometria căii.

Liniile noi, ce urmează a fi construite pe culoarele mari de transport, au fost clasificate în:

- linii exclusiv pentru trafic de călători;

- linii pentru trafic mixt;

În tabelul 1.4 sunt prezentate cerințele minimale pentru liniile ferate destinate transportului internațional:

**Tabelul 1.4**

Nr. Crt	Cerința	A Linii existente a căror infrastructură corespunde cerințelor impuse; linii ce urmează a fi reabilitate	B Linii noi	
			B1 în exclusivitate pentru trafic de călători	B2 pentru trafic mixt
0	1	2	3	4
1	Numărul de linii	-	2	2
2	Gabarit	UICB	UICC1	UICC1
3	Distanța minimă între axele liniilor abătute [m]	4,0	4,2	4,2
4	Viteza nominală minimă	160	300	250
5	Sarcina admisă pe osie [t] pentru: - locomotive ( $\leq 200$ km/h) - automotoare, rame ( $\leq 300$ km/h) - vagoane de călători - vagoane de marfă: • $\leq 100$ km/h • $\leq 120$ km/h • $\leq 140$ km/h	22,5 17,0 16,0 20,0 20,0 18,0	- 1,7 - - - -	22,5 17,0 16,0 22,5 20,0 18,0
6	Sarcina maximă uniform distribuită [t/m]	8,0	-	8,0
7	Tip tren pentru calculul podurilor	UIC 71	-	-
8	Declivitate maximă [‰]	-	35	12,5
9	Lungimea minimă a peroanelor [m]	400	400	400
10	Lungime minimă utilă pentru linii de trecere înainte [m]	750	-	750
11	Intersecții la nivel	nu există	nu există	nu există

Liniile de pe traseul culoarelor de transport europene trebuie să aibă următoarele caracteristici principale:

- minim două linii, pentru sporirea capacității de transport;
- gabarit sporit (UIC C1), pentru a asigura transportul combinat ( RO-LA) a autovehiculelor, remorcilor sau cisternelor, având 4 m înălțime și 2,5 m lățime;
- viteza nominală minimă pe liniile pentru trafic de călători să fie de 300 km/h iar pe cele pentru trafic mixt, de 250 km/h;
- trebuie sporită sarcina maximă admisă pe osie;
- trecerile la nivel pe liniile existente trebuie eliminate, iar pe cele noi sunt interzise;

Acordul AGC a devenit linia directoare pentru dezvoltarea rețelei feroviare europene.

În tabelul 1.5 sunt prezentate caracteristicile principale ale liniilor feroviare destinate transportului combinat.

**Tabelul 1.5**

Nr. crt.	Caracteristici	A Linii existente care corespund cerințelor și linii reabilite		B Linii noi
		Prezent	Viitor	
0	1	2	3	4
1	Număr linii	nu sunt date	nu sunt date	2
2	Gabarit		UIC B	UIC CI
3	Distanța minimă între axele liniilor [m]		4,0	4,2
4	Viteza nominală minimă [km/h]	100	120	120
5	Sarcina maximă pe osie [t]	≤100 km/h	22,5	22,5
		≤120 km/h	22,0	22,0
6	Declivitate maximă [‰]	nu sunt date	nu sunt date	12,5
7	Lungimea maximă a trenului [m]	600	750	750

## 2. Parametrii tehnici

Parametrii tehnici care caracterizează transporturile feroviare sunt:

- viteza de circulație;
- sarcina maximă admisă pe osie;
- influența solicitărilor dinamice asupra suprastructurii;
- influența sporirii sarcinii pe osie asupra elementelor componente ale suprastructurii;
- numărul firelor de circulație în linie curentă;
- numărul de linii și lungimea acestora în stații;

### 2.1. Viteza de circulație

Creșterea vitezei de circulație duce la diminuarea duratei transportului. În acest context toate administrațiile feroviare încearcă să sporească vitezele de circulație, deși această tendință este cea mai costisitoare. Pe unele linii moderne, de mare viteză, destinate în exclusivitate circulației trenurilor de călători se circulă deja cu 200...350 km/h, dar există deja experimente cu rezultate încurajatoare care demonstrează că și aceste viteze pot fi sporite în continuare. Se menționează că cea mai mare viteză a fost realizată în 18 mai 1990 în Franța: 515,3 km/h pe linia TGV Atlantique Nord.

Sporirea vitezei duce la creșterea consumului de energie, la creșterea pretențiilor față de calitatea liniei și a materialului rulant, ceea ce presupune investiții costisitoare. Sporirea vitezei duce la următoarele avantaje sociale și economice:

- prin scăderea duratei călătoriei crește timpul afectat pentru muncă și odihnă;

- sporește cantitatea de mărfuri transportată în unitatea de timp, crește viteza transportului și se optimizează exploatarea feroviară;
- sporește productivitatea muncii;

Viteza maximă de circulație este un indicator principal al aprecierii calitative a serviciilor feroviare.

În literatura de specialitate sunt definite următoarele tipuri de viteză în legătură cu linia de cale ferată:

- viteza maximă admisă ( $V_{\max \text{ adm}}$ ), care depinde de:
  - geometria liniei;
  - alcătuirea suprastructurii;
  - considerente privind protecția mediului;
  - instalații de siguranța circulației;
  - calitatea infrastructurii;
  - starea generală a căii;

Această viteză este stabilită cu ocazia dării în exploatare a căii ferate și poate fi micșorată o dată cu deprecierea stării căii.

- viteza de perspectivă ( $V_{\text{per}}$ ) este viteza minimă care trebuie obținută după finalizarea lucrărilor de reabilitare, modernizare, reconstrucție; de obicei:
 
$$V_{\text{per}} = 1,00 \dots 1,25 V_{\max \text{ adm}};$$
- viteza micșorată care poate fi cauzată de:
  - defecte și deformații constante, înrăutățirea stării căii, condiții de siguranța circulației, lucrări de cale etc., acestea se numesc restricții de viteze și pot fi eliminate o dată cu eliminarea cauzelor care le-au generat;

- geometria căii ( de ex. curbe cu raze mici, declivități mari etc.) a căror eliminare se poate realiza doar prin modificarea traseului; acestea se numesc limitări de viteză sau viteză plafon;

Trebuie subliniat că viteza maximă admisă este cea mai mică dintre vitezele maxime admise pentru cale, vehicul de tracțiune și vehicule tractate, dar poate fi limitată și de viteza de circulație trecută în mersul de tren, viteză care este obligatorie și care este stabilită din considerente de exploatare feroviară pe un sector de linie.

## 2.2. Sarcina maximă admisă pe osie

Sarcina maximă admisă pe osie din greutatea proprie a vagonului respectiv din greutatea încărcăturii transportată, ca parte care revine osiei:

$$Q_{\max} = \frac{G_v + G_m}{n} \quad [\text{kN}]$$

- unde:

- $G_v$  este greutatea proprie a vagonului (a materialului rulant) [kN];
- $G_m$  este greutatea încărcăturii [kN];
- $n$  este numărul de osii ale vagonului;

Sarcina maximă pe osie, admisă pentru o linie de cale ferată dată, depinde de capacitatea portantă a infrastructurii, a căii, de tipul șinei, traverselor, prinderii, poza traverselor, prisma căii, de viteza maximă admisă. Sarcina maximă admisă pe osie determină tipurile de locomotivă și încărcătura maximă a vagoanelor de marfă care pot circula pe linia respectivă.

Liniile noi precum și cele reabilitate, modernizate vor fi dimensionate conform recomandărilor UIC luând în considerare următoarele valori pentru sarcina maximă admisă pe osie ( $Q_{\max}$ ):

- $Q_{\max} = 225$  kN, pentru linii cu ecartament normal;
- $Q_{\max} = 250$  kN, pentru linii cu ecartament larg;
- $Q_{\max} = 125$  kN, pentru linii cu ecartament îngust.

### **2.3. Influența solicitărilor dinamice asupra suprastructurii**

Cercetările și măsurile efectuate la administrația feroviară germană ( DEUTSCHE BAHN-DB) au demonstrat că o linie clasică, obișnuită, alcătuită din șine tip 60 pe traverse din beton, cu 30 cm piatră spartă sub talpa traversei și un strat de repartiție având 15...30 cm grosime, suportă în condiții excepționale circulația materialului rulant cu viteză mare ( $\geq 200$  km/h) și având 225 kN sarcină pe osie.

Totodată au stabilit că sporirea sarcinii admise pe osie de la 200 kN la 225 kN nu a dus la sporirea semnificativă a volumului și costului lucrărilor de întreținere. Pentru a realiza acest deziderat au impus ca sarcina dinamică maximă admisă pe osie să nu depășească 340 kN pentru sarcina statică maximă admisă de 225 kN iar pentru geometria liniei (poziție în plan, profil în lung și profil transversal) au recomandat toleranțe zero.

Cele sus-menționate sunt demonstrate și prin materialul prezentat de comisia D161 a ORE care a căutat răspunsul la aceeași întrebare: cum influențează creșterea sarcinii statice pe osie de la 200 kN la 225 kN respectiv geometria liniei și viteza de circulație evoluția sarcinii dinamice pe roată ( pe osie). Cercetarea s-a referit și la costurile pe care le implică sporul de sarcină pe osie.

Cercetările au fost efectuate atât asupra căii cât și asupra materialului rulant și au demonstrat că odată cu sporirea sarcinii statice pe osie sarcinile dinamice sporesc aproximativ liniar. Așa cum a fost de așteptat, odată cu sporirea vitezei sarcinile dinamice sporesc dar factorul cel mai important pentru creșterea sarcinii



dinamice este dat de deformațiile geometriei căii în plan orizontal, profil longitudinal și profil transversal.

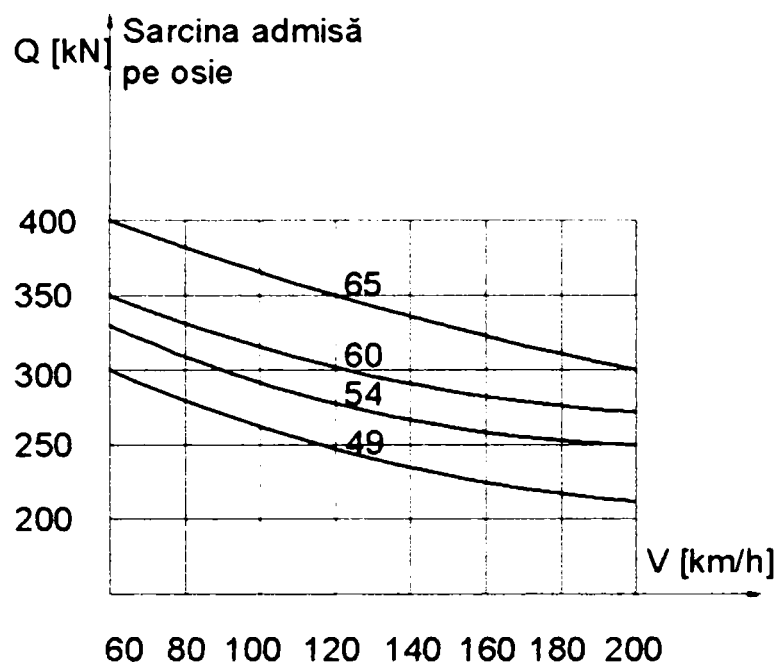
În ceea ce privește creșterea costurilor lucrărilor de întreținere, tot calitatea geometriei căii a fost factorul cel mai important și anume:

- dacă indicele de calitate BMS (după sistemul olandez de măsurare-apreciere a geometriei suprastructurii căii) crește de la 1 mm la 2 mm, costurile sporesc cu 23 %;
- dacă viteza sporește de la 80 km/h la 100 km/h, costurile sporesc cu 15 %;
- dacă sarcina pe osie sporește de la 200 kN la 225 kN, aceleași costuri cresc cu 8 %.

#### **2.4. Influența sporirii sarcinii pe osie asupra elementelor componente ale suprastructurii**

Analizând influența sporirii sarcinii pe osie asupra elementelor componente ale suprastructurii se pot trage următoarele concluzii:

- șinele:
  - odată cu creșterea sarcinii pe osie, crește și uzura laterală, în special pe firul exterior al curbelor;
  - la șinele mai ușoare (de exemplu tip 49) ruperile de șină sunt mai frecvente față de șinele mai grele (de exemplu tip 60), ceea ce impune supravegherea mai atentă a liniei;
  - sarcina maximă admisă pe osie este în funcție de viteza cu care circulă materialul rulant; în fig. 1.1. sunt prezentate diagrame ale sarcinii pe osie ( $Q$ ) în funcție de viteză ( $V$ ) pentru diverse tipuri de șină;



*Fig. 1.1. Sarcina admisă pe osie în funcție de viteză pentru diverse tipuri de șină*

- traversele:
  - nu apar probleme deosebite odată cu sporirea sarcinii pe osie, în special la traversele având suprafața de rezemare și înălțimea sporite;
- prisma căii:
  - în cazul unei suprastructuri corect realizate și bine întreținute, la aceeași densitate a traficului, creșterea sarcinii pe osie este permisă (de exemplu de la 200 kN la 225 kN) deoarece nu duce la sporirea semnificativă a cheltuielilor de întreținere;
  - din interpretarea rezultatelor măsurărilor efectuate rezultă că traficul mixt grăbește degradarea prismeii căii față de traficul exclusiv (numai călători sau numai marfă);
  - traficul mixt are o influență mai mare asupra degradării prismeii căii față de influența sporirii sarcinii pe osie.

## 2.5. Numărul firelor de circulație în linie curentă

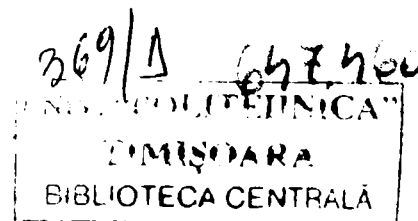
Traficul feroviar (în special cel de persoane) cunoaște o dezvoltare vertiginoasă în jurul marilor orașe, în zona marilor noduri feroviare, cu valori maxime în zonele suburbane.

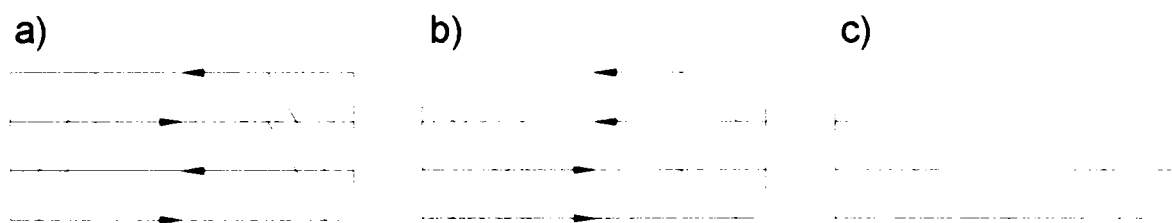
La început liniile curente în aceste zone fiind simple, traficul s-a desfășurat pe aceeași linie în ambele sensuri. Odată cu creșterea traficului a devenit necesară gruparea trenurilor în anumite perioade ale zilei, introducerea de instalații de siguranță circulației performante și cel puțin dublarea liniilor. S-a avut în vedere că în majoritatea cazurilor traficul este mixt iar trenurile circulă cu viteze variate: trenuri IC, rapide, accelerate, personale, de marfă, rapide de marfă, de lung parcurs, de scurt parcurs, suburbane, urbane, etc. Pentru sporirea capacității de circulație pe liniile duble, traficul unidirecțional pe fiecare fir de circulație a fost înlocuit cu traficul bidirecțional pe ambele fire prin introducerea de aparate de cale (de obicei diagonale). Astfel s-a putut ține seama de necesitățile de transport în diversele perioade ale zilei.

Următoarea etapă a reprezentat-o electrificarea liniilor care a dus la creșterea semnificativă a capacității de circulație.

Dacă măsurile sus-menționate au fost insuficiente, s-a trecut la sporirea numărului fire de circulație, rezultând linii triple, cvadruple sau multiple, eventual au fost construite linii noi pe trasee noi.

Experiența a demonstrat că realizarea, întreținerea și exploatarea unei linii cvadruple este mai economicoasă față de costurile aferente a patru linii simple. Modalități de exploatare ale unei căi ferate cvadruple sunt prezentate în fig.1.2.





**Fig. 1.2. Exploatarea căii cvaduble**

După posibilitățile de specializare a firelor de circulație din punct de vedere al exploatării feroviare, există două sisteme de organizare a circulației (fig.1.2 a și b) putându-se realiza și un sistem de tranziție (fig.1.2.c) între primele două. Avantajele organizării circulației „pe linii”(fig.1.2.a) sunt: posibilitatea executării în etape a liniilor duble vecine (primele putând fi exploatare pe durata realizării celorlalte două), respectiv exploatarea liniilor prin „sortarea” trenurilor după categorie, viteză, importanță etc. Organizarea circulației „pe sensuri de circulație” (fig.1.2.b) are următoarele avantaje: urmărirea mai ușoară a circulației, circulația mai sigură și mai confortabilă respectiv posibilitatea interconectării liniilor prin diagonale simple sau compuse.

Din nou trebuie subliniat că influența cea mai defavorabilă asupra capacității de circulație a liniilor duble o are faptul că pe fiecare linie circulă trenuri cu viteze mult diferite, creând un important disconfort pentru călători în special datorită întârzierilor respectiv duratelor de parcurs exagerate. Eliminarea acestei influențe este posibilă doar în cazul traficului omogen urban, regional, suburban etc.

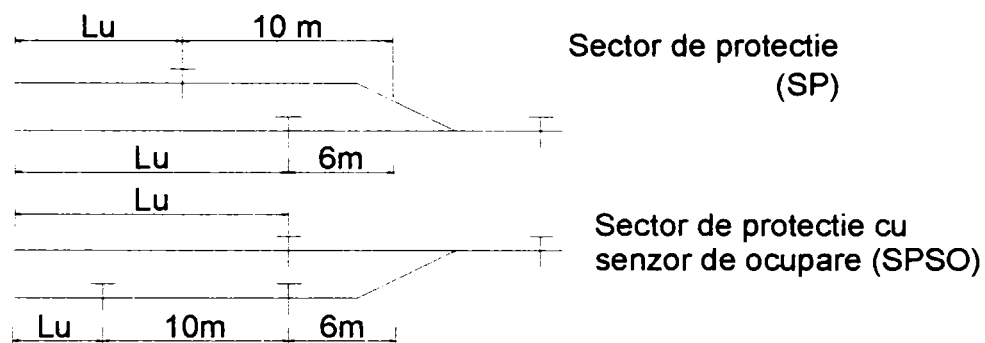
## **2.6. Numărul de linii în stații și lungimea acestora**

Numărul și lungimea liniilor în stații sunt determinate de necesitățile de trafic. Din acest motiv la proiectarea unei stații noi, unei sistematizări de stații

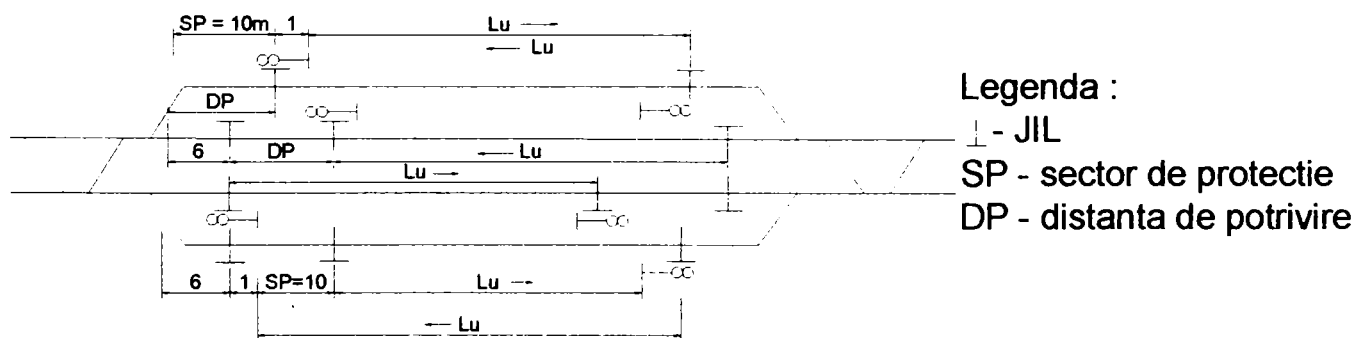
existente, reabilitării sau modernizării stațiilor, se pornește de la traficul feroviar de perspectivă.

Este deosebit de important ca să se facă diferență între lungimea reală și cea utilă a liniilor în stații. Cele mai lungi trenuri de marfă vor impune lungimea utilă minimă iar cele mai lungi trenuri de călători vor impune lungimea minimă a peroanelor.

Prescripțiile germane prevăd determinarea lungimilor utile ( $L_u$ ) conform fig. 1.3.



Lungimea utilă ( $L_u$ ) a liniilor cu semnale de ieșire.



**Fig. 1.3** Lungimea utilă a liniilor la DB

În comparație cu prescripțiile germane cele românești prevăd următoarele definiții pentru lungimile utile:

- pe liniile fără semnale de ieșire, lungimea utilă ( $L_u$ ) se măsoară între mărcile de siguranță extreme;
- pe liniile cu semnale de ieșire, lungimea utilă se măsoară de la semnalul de ieșire de la un capăt la marca de siguranță de la celălalt capăt al liniei.

## CAP. II GEOMETRIA CĂII

Pentru utilizatori traseul unei căi ferate este compus din aliniamente și curbe. Pentru inginerii de specialitate, geometria căii este mult mai complexă, depășește cu mult geometria aliniamentelor și a curbelor, este determinantă pentru mișcarea materialului rulant deoarece calea ghidează vehiculul. Inginerii constructori de căi ferate și azi se preocupă de perfecționarea geometriei căii în vederea sporirii vitezei de circulație, a condițiilor de confort, îmbunătățind și condițiile de siguranța circulației.

Fiecare administrație feroviară a cuprins în instrucții, reglementări, normative și standarde prescripții de proiectare, construcție, exploatare și întreținere a liniilor de cale ferată, prescripții care se bazează pe teorii și cercetări experimentale mai mult sau mai puțin asemănătoare. Scopul acestui capitol nu este prezentarea acestor prescripții ci prezentarea unei imagini despre evoluția concepției privind geometria căii și despre posibilitatea utilizării în viitor a unor noi abordări teoretice, încă neutilizate la nici o administrație feroviară.

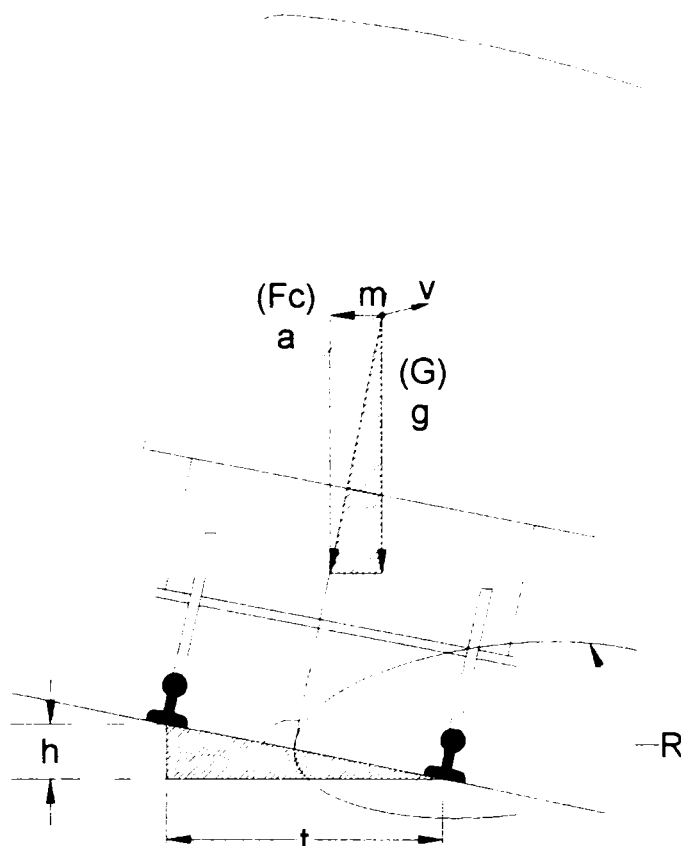
### 1. Traseul în plan

#### 1.1 Arcul de cerc și supraînălțarea

Traseul primelor linii de cale ferată era compus din aliniamente și arce de cerc. În mod firesc, pentru a asigura siguranța circulației, arcele de cerc aveau raze cât mai mari. Din evidențele păstrate din secolul XIX rezultă că raza minimă utilizată era  $R_{\min}=100$  m, valoarea sporită spre sfârșitul aceluiași secol fiind de  $R_{\min}=150$  m.

Această rază minimă este și azi valabilă pentru căile ferate clasice (fără contrașine), cu ecartamentul normal, cu limitarea corespunzătoare a vitezei.

O dată cu sporirea vitezei maxime, a devenit actuală introducerea supraînălțării în curbe. Folosind notațiile din figura 2.1 apare formula pentru calculul supraînălțării teoretice, așa cum o cunoaștem din manuale, inclusiv din cele mai recente.



**Fig 2.1.** Modelul de calcul pentru supraînălțarea teoretică.

În figura 2.1 au fost utilizate următoarele notații:

- $m$  – masa [kg]
- $R$  – raza curbei circulare [m]
- $t$  – distanța dintre punctele de rezemare roată – șină [mm]
- $h$  – supraînălțarea [m]
- $v$  – viteza [m/s]



- $g$  – accelerația gravitațională [ $m/s^2$ ]
- $a$  – accelerația transversală [ $m/s^2$ ]

Cu notațiile de mai sus rezultă:

$$\frac{F_c}{G} = \frac{a}{g} = \frac{v^2}{R \cdot g} = \frac{h_t}{t} \quad (2.1)$$

$$h_t = \frac{t \cdot v^2}{R \cdot g} = \frac{a \cdot t}{g} = \frac{a \cdot 1500}{0,81} = 153 \cdot a \quad (2.2)$$

În relația 2.1 supraînălțarea teoretică este notată cu  $h_t$

Se observă că în loc de forțe ( $F_c$  și  $G$ ), adică produsul newtonian al masei și accelerației, se poate lucra doar cu accelerații ( $a$  și  $g$ ) care pot fi raportate ca atare la supraînălțare și distanța între punctele de rezemare roată-șină ( $h$  și  $t$ ). Inginerul cunoscător de căi ferate a fost conștient și a utilizat un principiu al fizicii pe care doar Einstein a avut curajul să-l enunțe în varianta generalizată abia la începutul secolului XX:

„Nu este nici o diferență între accelerația rezultată din mișcare și cea gravitațională”

Pornind de la acest principiu în meseria noastră a devenit principiu de bază ca în analizele teoretice masa și forța să reprezinte doar un rol de factor de proporționalitate și ca atare pot fi neglijate în calcule.

Din păcate, o serie de lucrări științifice, teorii, metode de calcul, au fost bazate pe acest principiu. Pentru o lungă perioadă de timp s-a considerat că nu trebuie luate în considerare în calcule forma vehiculului, momentul de inerție al acestuia, câmpul de forțe din interiorul vehiculului, energia, puterea etc. și este suficient ca vehiculul să fie redus la un punct material căruia i se studiază mișcarea fără a fi luate în calcul forțele care o determină, chiar dacă scopul acestor calcule era îmbunătățirea, perfecționarea geometriei liniei.

Totuși, trebuie observat că relația 2.1 este importantă deoarece stabilește o legătură matematică între viteză și rază respectiv limitele fizice ( mecanice)ale proiectării geometriei căii. Mai trebuie observat că având date raza curbei R și viteza (v), se poate determina supraînălțarea (h), astfel încât cele două șine să fie la fel încărcate, solícitate, adică și în curbe să se păstreze echilibrul din aliniament. Supraînălțarea rezultată astfel a fost numită de englezi, primii constructori de căi ferate, „EQUILIBRIUM CANT “ ( înclinare de echilibru ) și este notată și azi cu E, iar viteza corespunzătoare este numită „EQUILIBRIUM SPEED “ ( viteză de echilibru ).

S-a demonstrat că această viteză nu poate fi utilizată în orice situație. Trebuie luat în considerare cazul trenurilor care circulă cu viteză redusă, a trenurilor care se opresc în curbe. În aceste situații firul interior va fi supraîncărcat. S-a căutat un compromis: prin micșorarea supraînălțării teoretice firul exterior va fi supraîncărcat. A apărut astfel noțiune de „insuficiență de supraînălțare“ (I), numită de englezi „CANT DEFICIENCY “, care duce la determinarea accelerației transversale necompensate ( $\gamma_t$ ).

În cazul supraînălțării teoretice, accelerația transversală necompensată este nulă.

$$\gamma_t = \frac{v^2}{R} - \frac{g \cdot h_t}{t} = 0 \quad (2.3)$$

Dacă supraînălțarea teoretică trebuie micșorată pentru trenurile de marfă care circulă cu viteză redusă, rezultă:

$$\gamma_t = \frac{v^2}{R} - \left( \frac{h_t}{153} - \frac{I}{153} \right) = \frac{I}{153} \quad (2.4)$$

Dacă se acceptă  $I = 100$  mm, rezultă

$$\gamma_t = \frac{100}{153} = 0,65 \text{ m/s}^2 \quad (2.5)$$

În 1989, UIC a făcut recomandări care au fost aplicate la o serie de administrații feroviare, așa cum este prezentat în tabelul 2.1

**Tabelul 2.1**

Caracteristici geometrice			(ERRI) UIC 703.F		Ungaria (MAV)		Italia (FS)	Germania (DB)	Franța (SNCF)	Marea Britanie	Japonia		
Denumirea limitei	Notare	U.M.	1953	1983	1953	1983					Tokaido	Sanyo	
Viteză	v	km/h	120	200	160	160	250	250	300	240	200	260	
Insuficiența de supraînălțare	N	I	mm	80	100	64	80	121	40	50	110		
	E			100	120	89	105						
	M			130	130								
Exces de supraînălțare	N	E	mm	50	70		85	100	50	110	110		
	E			70	90								
	M			90	110								
Supraînălțare maximă	N	h <sub>max</sub>	mm	150	120	125	136	125	65	180	150	180	180
	E			160	150	110	116						
	M				160								
Accelerație transversală necompensată	N	n	m/s <sup>2</sup>	0,53	0,67	0,42	0,52	0,81	0,27	0,33		0,58	0,45
	E			0,67	0,80	0,58	0,69						
	M			0,86	1,00								
Raza minimă	R <sub>min</sub>	m	1063	1558	1600	1400	2982	2170	3760	3200	2500	4000	
Viteza de ridicare	N	v <sub>r</sub>	mm/s	25	25			36	13	30	55		
	E			70	70								
	M			90	90								
Variația acelerației transversale	N	I	mm/s <sup>3</sup>	0,17	0,17			0,24	0,08	0,20	0,25		
	E			0,47	0,47								
	M			0,60									

Notățiile folosite în tabel sunt:

- N – condiții normale;
- E – condiții excepționale;
- M – condiții maxime;
- \* – cale cu joante ;

Valorile corespunzătoare vitezelor mari, trebuie astfel alese încât valorile caracteristicilor geometrice și cinematice să nu fie depășite. Se menționează că administrațiile feroviare preferă alegerea unor raze mai mari față de cele prevăzute în tabelul 2.1.

## 1.2 Racordări

O dată cu stabilirea necesității și importanței supraînălțării s-a pus problema realizării rampei supraînălțării : în aliniament, în curba circulară sau parțial în aliniament și parțial în curba circulară.

Primele lucrări care au tratat problema racordărilor au ca autori inginerii francezi Chavés (1865 ) și Nördling (1867). Nördling este considerat părintele racordărilor parabolice.

Nördling a considerat că unei rampe liniare a supraînălțării îi corespund elemente de arce de cerc având supraînălțarea proporțională cu raza arcului respectiv. Din această teorie, mult mai târziu s-a dezvoltat alta, care a definit mult mai simplu proprietatea de bază a racordărilor: supraînălțarea trebuie să fie proporțională cu curbura.

La început, racordările au fost socotite importante doar pentru realizarea rampei supraînălțării. Nu a existat nici o preocupare privind confortul călătorilor, sensibilităților fiziologice ale celor care călătoreau în vagoane. Accelerația transversală și variația acesteia au rămas „ascunse“ în relațiile de calcul.

Este de apreciat că Nördling a stabilit deja relația de calcul a supraînălțării teoretice:

$$h = \frac{t \cdot v^2}{g \cdot R} \quad (2.6)$$

Din această relație rezultă clar că supraînălțarea este proporțională cu accelerația transversală ( $v^2/R$ ) și în mod firesc problema principală a devenit înclinarea maximă a rampei supraînălțării, care a fost stabilită la 2 ‰ adică 1:500.

Nördling a reușit să ajungă la formula de calcul a parabolei de gradul 3:

$$y = \frac{X^3}{6P} \quad (2.7)$$

și a ajuns la determinarea lungimii racordării

$$L \geq \frac{P}{R} = \frac{C}{R} \quad [m] \quad (2.8)$$

unde  $P = C = RL$  este parametrul care este utilizat și azi.

Nördling a determinat și deplasarea spre interior al arcului de cerc primitiv:

$$m = \frac{L^2}{24R} \quad [m] \quad (2.9)$$

Mai mult prin calcule empirice s-a ajuns la relația:

$$L = \frac{12000}{R} \quad [m] \quad (2.10)$$

Pornind de la relația 2.8, Nördling a întocmit un tabel care nu conține variații în funcție de viteză. Trebuie totuși remarcat că pentru viteze de până la 60...70 km/h valorile calculate de Nördling pot fi și azi acceptate.

Probabil Nördling a renunțat cu bună știință la un detaliu: diferența de lungime între racordarea propriu – zisă și proiecția acesteia pe direcția tangentei inițiale (aliniamentului). Această scăpare a produs o serie de polemici și a creat o serie de dificultăți tehnice în momentul în care viteza trenurilor a depășit 50...60 km/h. O serie de dificultăți au rezultat din faptul că parabola de gradul 3 s-a îndepărtat prea mult de arcul de cerc central, în special în cazul racordărilor lungi, diferențele nemaiputându-se neglija. Aceste diferențe au fost diminuate prin corecții, astfel calculele și azi pot fi aplicate cu succes dacă trasarea liniei se face printr-o metodă geodezică obișnuită.

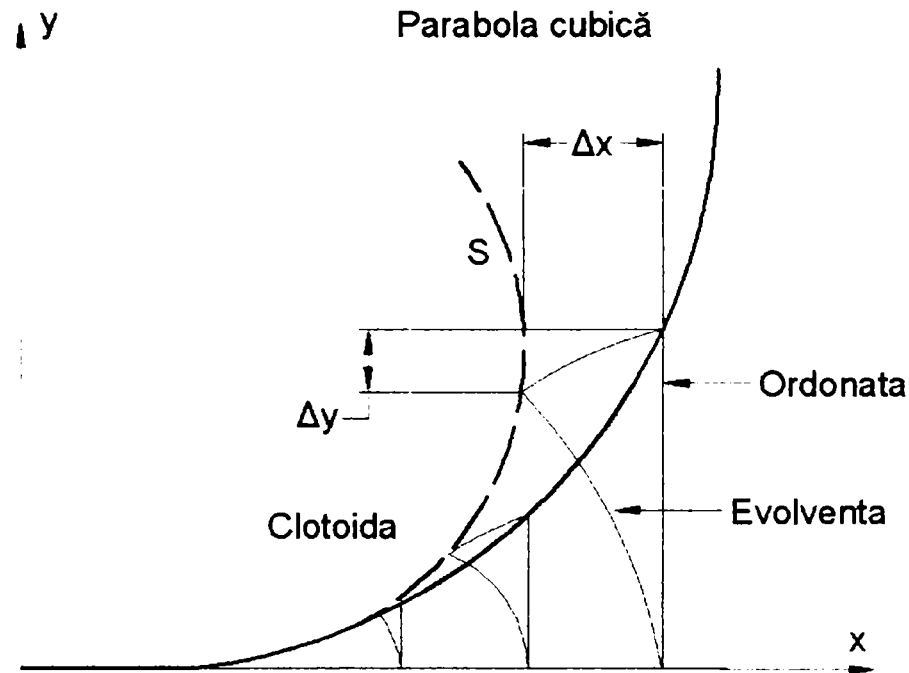
Până la mijlocul secolului XX, parabola cubică a fost singura acceptată de administrațiile feroviare din lume.

Totuși, polemicile privind geometria racordărilor încă nu s-au încheiat în special din cauza acceptării sau nu a diferențelor dintre lungimea racordării și lungimea proiecției acesteia pe direcția tangentei inițiale. Azi se cunoaște că aceste

diferențe pot fi eliminate ușor dacă parabola de gradul 3 este înlocuită cu clotoida, adică în relația:

$$y = \frac{X^3}{6RL} \text{ [ m ]} \quad (2.11)$$

$y$  – nu va reprezenta ordonata corespunzătoare abscisei  $X$ , ci evolventa corespunzătoare arcului cu lungimea  $s$  (figura 2.2)



**Fig. 2.2.** Diferența dintre parabola de gradul 3 și clotoidă

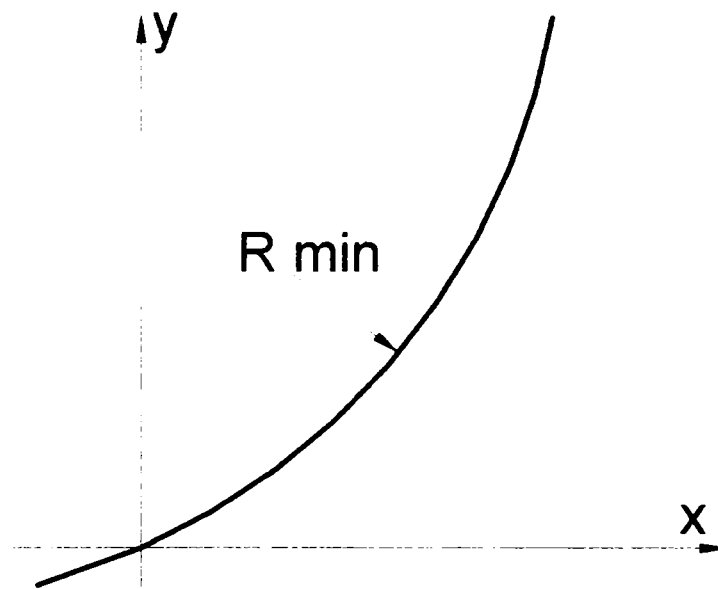
În studiul parabolei cubice, inginerul Jáky în 1921 a făcut un pas înainte considerând că în relația 2.10 care exprimă curbura într-un sistem de coordonate carteziene:

$$\frac{1}{R} = \frac{y''}{\sqrt{1 + y'^2}} \quad (2.12)$$

termenul  $y'^2$  nu trebuie neglijat indiferent de valoarea acestuia. A ajuns la concluzia că „lungimea racordării nu trebuie să depășească o șeptime din valoarea razei”, pentru ca diferențele acceptate să fie sub valoarea preciziei măsurătorilor.

Rezultă că Jáky nu a schimbat relația de calcul ci a limitat lungimea racordărilor pe care relația 2.12 poate avea aplicabilitate. O dată cu creșterea vitezelor de circulație, limitarea lungimii racordării a devenit o problemă care trebuia rezolvată.

În 1940 inginerul Hendel deja a propus ca pentru a realiza racordări suficient de lungi să fie utilizate alte relații de calcul, alte geometrii pentru acestea: lemniscate, sinusoide, parabole de grad superior etc. Studiind imperfecțiunile parabolei de gradul 3 a ajuns la concluzia că variația curburii (pornind de la relația 2.12) este crescătoare până la o valoare maximă după care are o descreștere accelerată.(fig 2.3)



**Fig 2.3.** Valoarea minimă a razei într-un punct al parabolei de gradul 3

Pentru determinarea influenței negative a aproximărilor, Hendel a propus să se utilizeze relația de calcul implementată de administrația feroviară cehoslovacă:

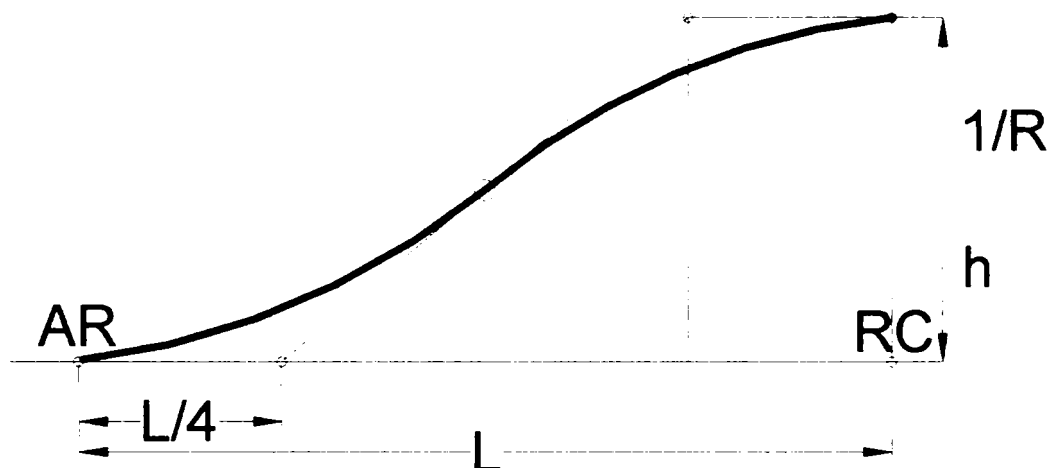
$$y = \frac{X^3}{6RL \cos \alpha} \quad ( 2.13 )$$

unde  $\alpha$  este unghiul format de tangenta la racordare cu abscisa. iar L este lungimea racordării. Prin dezvoltări în serie Hendel a obținut:

$$L = 1 + \frac{l^3}{40RL} \quad (2.14)$$

relația care este și azi utilizată de unele administrații feroviare

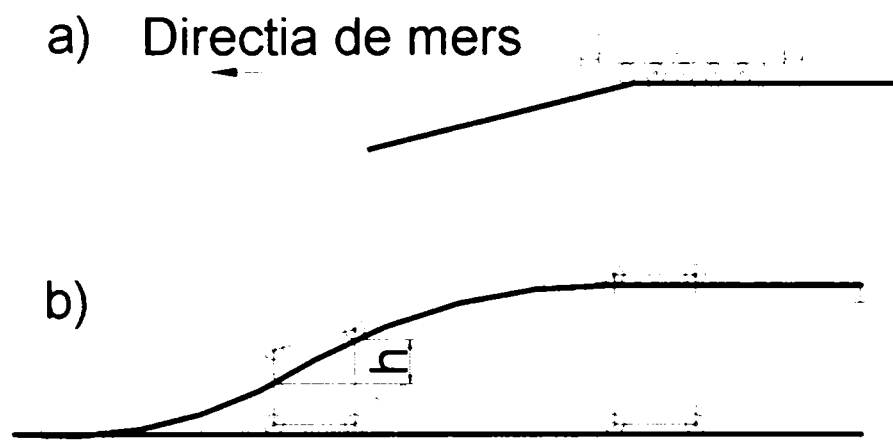
În aceeași perioadă, inginerul Schramm a propus ca rampa supraînălțării să fie realizată după o curbă în S, formată din două parabole de gradul 2, cu un punct de inflexiune la mijlocul racordării, rezultând o racordare parabolică de gradul 4 (fig. 2.4).



**Fig. 2.4.** Rampa supraînălțării și variația curburii după parabole de gradul 2

Analizând rampa în S (indiferent de geometria rampei) Hendel și Schramm au considerat că există pericol de deraiere deoarece una din roțile boghiului sau a vagonului cu două osii se poate „descărca”, adică dispăre sarcina verticală pe roată. Această teorie este lipsită de fundament, deoarece pericolul deraierii este în funcție de torsionarea căii (coroborată cu viteza de ridicare și/sau coborâre a roții, respectiv viteza de circulație a materialului rulant), iar torsionarea este diferența de supraînălțare corespunzătoare bazei rigide având ampatamentul A (fig. 2.5)





*Fig. 2.5. Torsionarea căii*

Unul din avantajele rampei în S (după Hendel ) este acela că deplasarea  $m$  spre centrul curbei se reduce cu circa 50 %.Nici acest avantaj nu trebuie exagerat deoarece la construcția căii noi sau la refacția acesteia mărimea  $m$  nu reprezintă un cost suplimentar, dar poate fi importantă în cazul liniilor electrificate pentru că presupune modificarea poziției firului de contact (eventual chiar a stâlpilor LC ).

Trebuie subliniat că acceptând ideea că racordarea lungă prezintă avantaje cinematice și cinetice, nu trebuie uitat că micșorarea valorii deplasării  $m$  nu reprezintă un avantaj,ci un dezavantaj !

Cu cât mai mare este  $m$  cu atât vor fi mai favorabile caracteristicile geometrice, mecanice și de confort ale racordării.

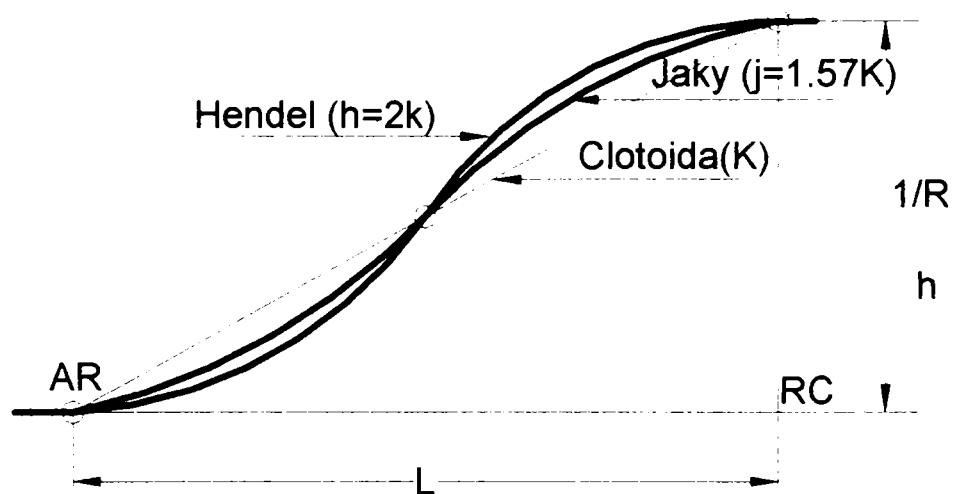
Dacă  $m = 0$ ,nu există racordare !

Pe aceste considerente se bazează prevederile instrucțiunile germane care nu limitează lungimea minimă a racordării, nu impun geometria racordării dar impun valoarea minimă a deplasării arcului de cerc central ( $m$ ).Rezolvarea problemei este lăsată în sarcina inginerului proiectant care, având impuse datele problemei, nu va „reuși” să proiecteze o racordare prea scurtă.

În literatura de specialitate nu prea este subliniat un dezavantaj important al racordării în S față de racordările parabolice, și anume în punctul de inflexiune

variația accelerației transversale sau a vitezei de ridicare a roții pe firul exterior are valori mai mari (chiar mult mai mari) față de aceeași parametri pe o racordare parabolică având aceeași lungime.

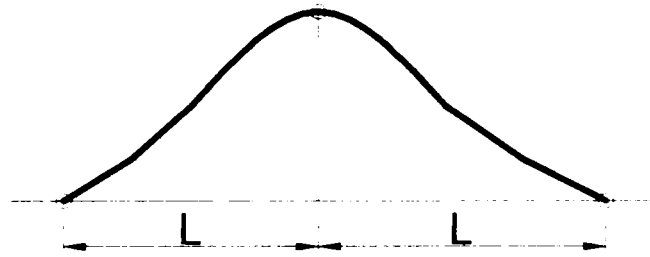
Datorită valorilor exagerate în zona punctului de inflexiune, unele administrații feroviare (DB, MAV) au preferat încă din deceniul 4 și 5 din secolul XX, racordarea sinusoidală față de parabola de gradul 4 propusă de Schramm și Hendel, deoarece parametrii sus-menționați sporesc doar cu 57% față de 100% (fig. 2.6)



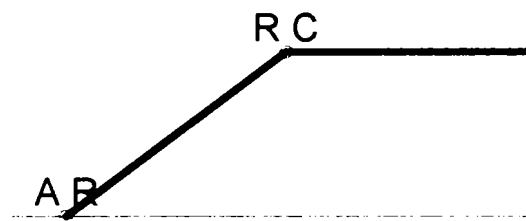
**Fig. 2.6.** Variația curburii pentru trei tipuri de racordări având aceeași lungime

Aceste prescripții noi au permis utilizarea unor curbe formate din două racordări cap la cap, în locul curbelor circulare scurte cu racordări la capete, cu observația că racordările trebuie să aibă variația curburii și rampa supraînălțării în S. Avantajul remarcabil al racordărilor în S a fost tangenta comună în punctele AR, RC, CR și RA la rampele supraînălțării. Comentând acest avantaj, trebuie observat că în ce privește variația curburii, toate tipurile de racordări în S prezintă tangente comune în punctele AR, RC, CR, și RA.

În partea a 2-a secolului XX au apărut teorii ale racordărilor care au presupus renunțarea la rampele liniare datorită punctelor de frântură în punctele AR, RC, CR și RA. (fig. 2.7 și 2.8 )



*Fig. 2.7. Variația curburii după două sinusoide cap la cap*



*Fig. 2.8. Rampa suprainălțării cu frânturi în punctele AR și RC*

Analizând racordările parabolice, s-a pus întrebarea firească dacă variația „neplăcută, inestetică, frântă ” a curburii, produce efecte reale de disconfort sau aceste efecte rezultă doar dintr-un calcul bazat pe principii greșite sau parțial corecte ?

S-a arătat deja că nu se poate vorbi despre șoc transversal, deoarece curbele de racordare nu au frânturi în AR, RC, CR și RA ( au tangente comune la aliniamente și cu curba circulară ), durata trecerii punctului material ( sau a unui punct din materialul rulant ) este nulă și ca atare nu rezultă nici deplasare laterală în aceste puncte. Pentru a da o explicație corectă, trebuie să se apeleze la o noțiune mai rar utilizată a mecanicii: puterea mecanică.

Din punct de vedere al cineticii (deci al dinamicii ), se poate vorbi despre efectul energiei cinetice:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (2.15)$$

doar dacă acționează pe o durată definită.

La fel, impulsul (cantitatea de mișcare )

$$I = m \cdot v \quad \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right] \quad (2.16)$$

are doar atunci efect, dacă deplasarea (în [m]) diferă de zero.

Rezultă că energia ( $E_c$ ) trebuie înmulțită cu timpul (în [s]) iar impulsul (I) cu deplasarea (în [m]) ca să se obțină puterea mecanică în  $\left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \right]$

Nu trebuie să deranjeze dimensiunea suprafeței [ $\text{m}^2$ ] deoarece puterea mecanică din punct de vedere fizic este general valabil. De exemplu, nu este indiferent ca o masă (greutate) așezată pe un teren (mediu) plastic, pe ce suprafață se întinde și care va fi durata solicitării, deoarece astfel va rezulta efectul solicitării care este în raport cu tasarea produsă.

Pornind de la semnificația puterii mecanice, rezultă că frânturile în diagrama curburii (AR, RC etc.) nu au nici un efect fizic și fiziologic, deci nu influențează ca atare confortul călătorilor și, cu atât mai puțin siguranța circulației.

În timp ce inginerii constructori de căi ferate au polemizat despre parabola cubică, un picher german, HÖFFER și șeful lui de secție, inginerul NALENZ, a stabilit principiile retrăsării curbilor prin metoda diagramei unghiurilor (WINKELBILDVERFAHREN), care este o metodă grafică. Suportul matematic complet și fără cusur a fost realizat de inginerul GERHARD SCHRAMM care a stabilit că geometria în plan a unei linii de cale ferată este integrala simplă a diagramei unghiurilor și integrala dublă a diagramei curburii. Metoda se bazează

pe săgețile măsurate pe firul exterior al curbei și determină ripările necesare pentru a aduce curba deformată la poziția curbei ideale, nedeformate. Metoda HÖFFER- SCHRAMM (sub această denumire este cunoscută în literatura de specialitate) este independentă de precizia parabolei cubice deoarece nu lucrează cu tangenta la curbă. În loc de sistemul de coordonate carteziane se lucrează cu diagrame (funcții) lungime arc-curbă. Administrația feroviară germană (și nu numai) a dezvoltat metoda diagramei unghiurilor printr-o metodă de calcul numerică care a fost utilizată pentru a crea un program de calcul eficient pentru retrasarea curbelor.

## 2. Evoluția teoriei racordărilor

După cel de-al doilea război mondial, progresul economiilor naționale a impus atât repararea cât și modernizarea căilor ferate distruse de război. Problema care trebuia rezolvată (și care la CFR este și azi extrem de actuală) constă în sporirea vitezei maxime și, implicit, în sporirea lungimii racordărilor.

### 2.1 Introducerea clotoidei la racordările liniilor CF

Până în anii '50 lungimea minimă a racordărilor ( $L_{\min}$ ) s-a determinat cu una din relațiile:

$$L_{\min}=8 \cdot V \cdot h \text{ [m]} \quad (2.17)$$

sau

$$L_{\min}=10 \cdot V \cdot h \text{ [m]} \quad (2.18)$$

unde:

- $V$  – este viteza maximă, în [km/h];

- $h$  – supraînălțarea în curba circulară, în [m];

Relația 2.18 este utilizată și azi atât de către CFR cât și de alte administrații feroviare. Se observă că relația 2.18 se bazează pe valoarea supraînălțării ( $h$ ) și limitează înclinarea maximă a rampei supraînălțării, deci torsionarea căii. Deși în această relație este „ascunsă” accelerația transversală, inginerul de căi ferate a lucrat doar cu tabele de calcul și ca atare i-a „scăpat” dinamica mișcării materialului rulant, efectele mișcării asupra căii, a călătorilor, a mărfurilor și, nu în ultimul rând, a materialului rulant.

În această situație, a fost hotărâtă introducerea clotoidei cu respectarea principiului ca supraînălțarea să rămână proporțională cu curbura și amândouă să aibă variație liniară în raport cu lungimea racordării:

$$h \div \frac{1}{R} = C = f(L) \quad (2.19)$$

Experiența de atunci a demonstrat că pentru o curbă circulară având raza  $R = 400$  m, viteza maximă este  $V_{\max} = 80$  km/h, iar lungimea minimă a racordării este  $L = 100$  m. A rezultat că parametrul  $R \cdot L$  care stă la baza determinării geometriei racordării are valoarea  $R \cdot L_{\min 80} = 400 \cdot 100 = 40\,000 \text{ m}^2$

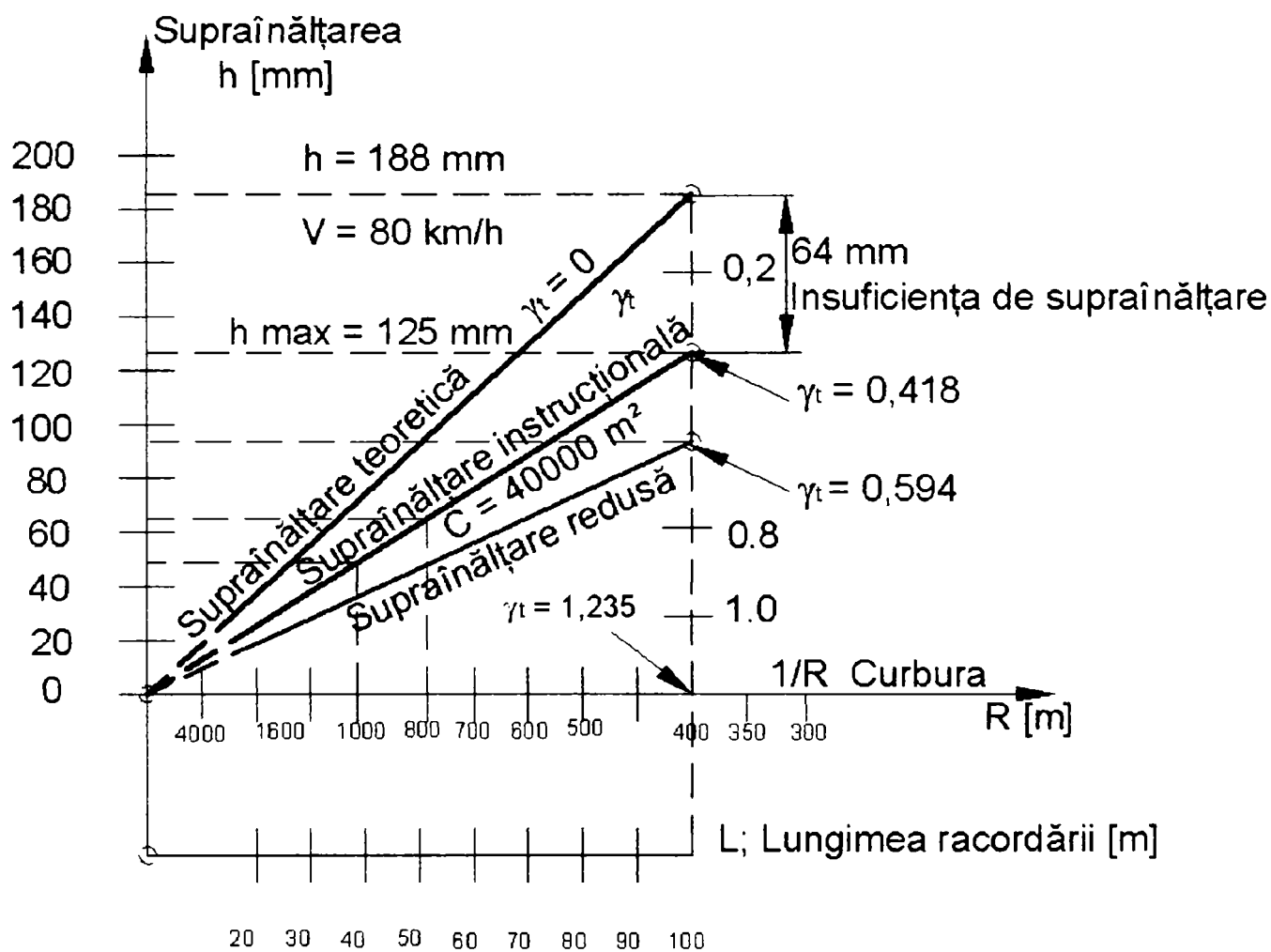
Pentru calculul supraînălțării teoretice ( $h_t$ ) s-a calculat accelerația transversală (centrifugă) :

$$a_c = \frac{v^2}{R} = \left( \frac{V}{3.6} \right)^2 \cdot \frac{1}{R} = \frac{80^2}{3.6^2 \cdot 400} = 1,234 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

și a rezultat:

$$h_t = \frac{a_c \cdot t}{g} = \frac{1.234 \cdot 1500}{9.81} \approx 189 [\text{mm}]$$

Ținând seama de traficul mixt, pentru trenurile de marfă această supraînălțare este exagerat de mare. Astfel s-a decis ca supraînălțarea efectivă ( $h_{ef}$ ) să reprezinte 2/3 din valoarea supraînălțării teoretice, adică:  $h_{ef} = 125$  mm. Această valoare a corespuns celei determinate în perioada anterioară în baza relației 2.18:  $L=10 \cdot V \cdot h$  (fig. 2.9)



**Fig. 2.9.** Diagrama de supraînălțare după instrucțiunile din anii ' 50

Din diferența dintre supraînălțarea teoretică ( $h_t$ ) și cea efectivă ( $h_{ef}$ ) a rezultat noțiunea de „insuficiență de supraînălțare” cu care lucrează azi majoritatea administrațiilor feroviare. Administrația feroviară germană, pornind de la calculul de mai sus, a stabilit insuficiența de supraînălțare

(ÜBERHÖHUNGSFEHLBETRAG):  $189 - 125 = 64$  mm, căreia îi corespunde o accelerație transversală necompensată de supraînălțare ( $\gamma_t$ ), echivalentă unei accelerației transversale libere, de:

$$\gamma_t = \frac{V^2}{R} - \frac{h_{ef} \cdot t}{g} = \frac{80^2}{3.6^2 \cdot 400} - \frac{125 \cdot 1.5}{9.81} = 0,42 \text{ m/s}^2$$

Pornind de la parametrul ( $P = R \cdot L = 40\,000 \text{ m}^2$ ), acceptat, se poate determina lungimea racordării pentru orice  $R_1 \geq 400$  m:

$$L_1 = \frac{P}{R_1} \text{ [m]}$$

Rezultă astfel diagramele prezentate în fig. 2.10

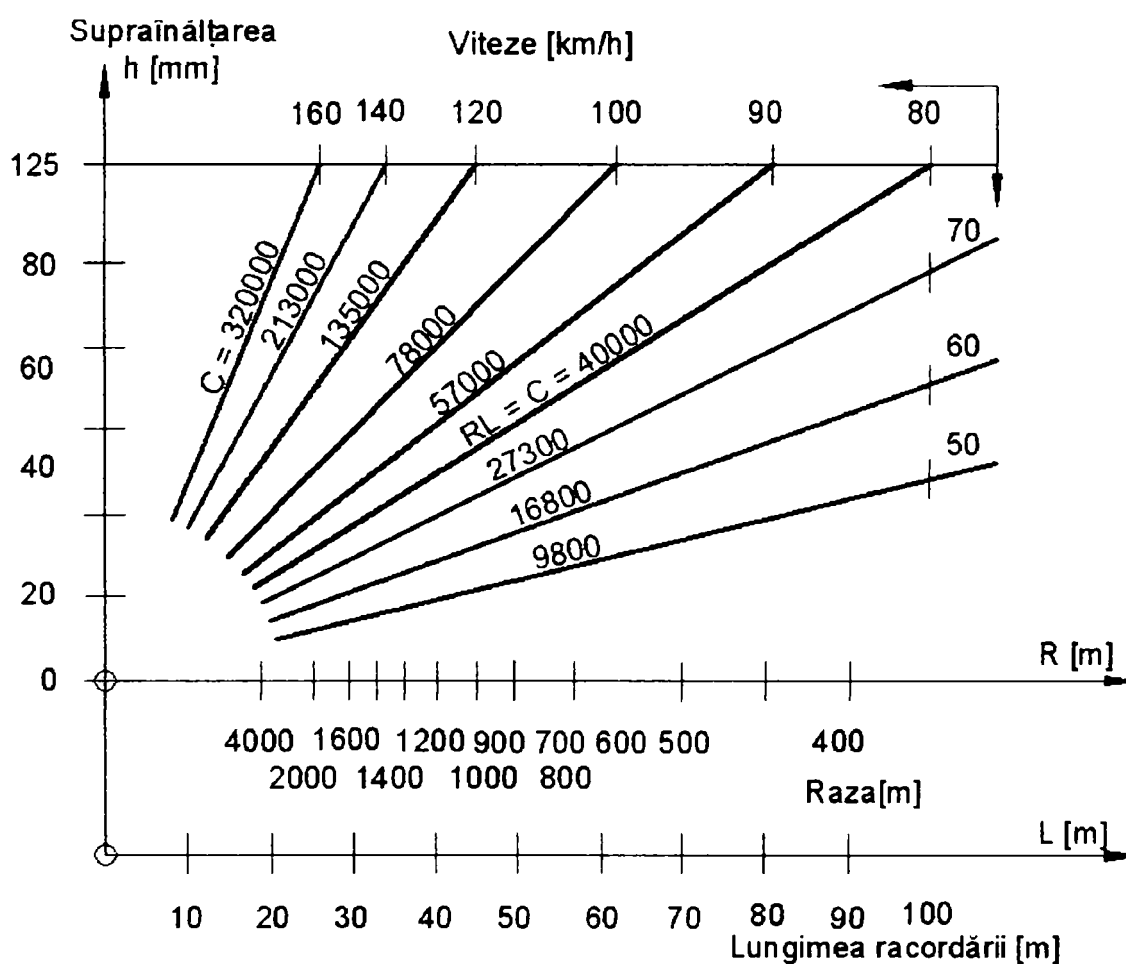


Fig. 2.10. Diagrame de supraînălțare în funcție de  $V_{max}$



Utilizarea diagramelor din fig. 2.10 se face astfel:

- se calculează durata parcurgerii racordării  $L = 100$  m cu viteza  $V = 80$  km/h  $\rightarrow v = 22,22$  m/s

$$T = \frac{L}{v} = \frac{100}{22,22} = 4,5 \text{ m/s} \quad (2.20)$$

- rezultă că creșterea accelerației transversale necompensate ( $\gamma_t$ ) de la 0 la  $0,42$  m/s<sup>2</sup> se produce în 4,5 s;
- se impune ca pentru orice viteză ( $V$  sau  $v$ ), variația accelerației transversale necompensate să se producă în 4,5 s;
- rezultă lungimea minimă impusă pentru curba de racordare:

$$L_{\min} = T \cdot v = 4,5 \cdot v; \quad (2.21)$$

- exemplificând pentru  $V = 160$  km/h ( $v = 44,44$  m/s) rezultă  $L_{\min} = 4,5 \cdot 44,44 = 200$  m;
- impunându-se valoarea maximă pentru accelerația transversală necompensată ( $\gamma_t = 0,42$  m/s<sup>2</sup>) rezultă raza  $R_{\min} = 1600$  m, și se determină parametrul  $P = R \cdot L = 1600 \cdot 200 = 320000$  m<sup>2</sup>

Este de menționat că neluând în considerare supraînălțarea ( $h_{ef} = 0$ ), variația accelerației transversale este o constantă:

$$I_t = \frac{a_c}{T} = \frac{v^2}{R \cdot T} = \frac{1,234}{4,5} = 0,274 \text{ [m/s}^3\text{]} \quad (2.22)$$

Care împreună cu relația 2.20 duce la expresia:

$$I_t = \frac{v^3}{R \cdot L} \text{ [m/s}^3\text{]} \quad (2.23)$$

identică cu relația de calcul socotită nouă absolută în literatura de specialitate de după 1975. Această analogie este fictivă, deoarece este valabilă doar în cazul particular  $h_{ef} = 0$ .

Dacă se ține seama de supraînălțarea  $h_{ef} \neq 0$ , se poate ajunge la valori limită din condiții de confort (condiții cinematice):

$$I_{ef} = \frac{\gamma_t}{T} = \frac{0,42}{4,5} = 0,0918 \text{ [m/s}^3\text{]} \quad (2.24)$$

În cazul unor linii de cale ferată și de metrou care pot fi realizate cu  $h_{ef} = h_t$ , accelerația transversală și variația acesteia sunt nule. Parametrul  $P = R \cdot L$  rămâne valabil, dar sporirea vitezei este posibilă doar cu prețul înclinării mai aspre a rampei supraînălțării.

În mod firesc pentru orice  $R > R_{min}$ ,  $h_{ef}$  scade deoarece rămâne proporțională cu curbura ( $1/R$ ):

$$\frac{h_{max}}{h_R} = \frac{C_{max}}{C_R} = \frac{R}{R_{min}} \quad (2.25)$$

Totodată, pentru  $R > R_{min}$  scade și accelerația transversală dacă se menține viteza  $V$ .

Concluziile teoriei prezentate au fost cuprinse în tabelul 2.2.

**Tabelul 2.2**

Viteza	v, km/h	30	40	60	80	100	120	140	160
Raza	R, m	150	200	300	400	600	900	1200	1600
Viteza unghiulară	$\omega$ , 1/s	0,055				0,046	0,037	0,032	0,027
Accelerație transversală teoretică	$a_c$ , m/s <sup>2</sup>	0,46	0,617	0,926	1,234				
Supraînălțare teoretică	$h_t$ , mm	70	94	141	$189 \pm_1^8$				
Supraînălțare maximă	$h_{max}$ , mm	37	62	93	125				
Accelerație transversală necompensată	$\gamma_T$ , m/s <sup>2</sup>	0,165	0,211	0,332	0,42				
Parametrul racordării	$\frac{C}{1000}$ , m <sup>2</sup>	2,7	5,0	16,8	40,0	78,0	135,0	213,0	320,0
Timp de parcurs	T, s	2,16	2,23	4,5					
Variația accelerației transversale dacă $h = 0$	I, m/s <sup>3</sup>	0,214	0,274						
Variația accelerației transversale dacă $h \neq 0$	I, m/s <sup>3</sup>	0,08	0,091						
Rampa supraînălțării	$m/L$ , mm/m	2	2,5	1,66	1,25	1,00	0,83	0,72	0,625
Viteza de ridicare	$\frac{m}{T}$ , mm/s	17	27,7						
Raporturi importante		$a_c/h_t=3$ ;			$I_t/I_{ef}=3$				

Din tabelul 2.2 se remarcă următoarele valori:

- supraînălțarea maximă:  $h = 125 \text{ mm}$ ;
- accelerația transversală teoretică maximă:  $a_c = 1,234 \text{ m/s}^2$ ;
- accelerația transversală necompensată maximă:  $\gamma_t = 0,42 \text{ m/s}^2$ ;
- durata parcurgerii racordării celei mai lungi:  $T = 4,5 \text{ s}$ ;
- variația accelerației transversale:  $I_t = 0,274 \text{ m/s}^3$ ;
- variația accelerației transversale necompensate:  $I_{cf} = 0,0918 \text{ m/s}^3$ ;
- viteza de ridicare a roții pe firul exterior:  $v_r = \frac{h}{T} = 27,7 \text{ mm/s}$ ;
- înclinarea rampei supraînălțării:  $I = \frac{h}{L} = 1 : 800 = 1,25 \text{ ‰}$ ;

Interdependența dintre valorile de mai sus face ca orice modificare a uneia din valori să ducă la modificarea tuturor celorlalte valori.

În concluzie, introducerea clotoidei a creat posibilitatea realizării unei geometrii unitare, oglindită și în tabelul 2.2. Deosebit de importante sunt și rapoartele menționate în ultimul rând al aceluiași tabel.

## 2.2 Cazul vitezelor mai mici de 80 km/h respectiv 40 km/h

În cazul vitezelor mai mici de 80 km/h, limitarea accelerației transversale ar duce la sporirea nejustificată a cheltuielilor de întreținere a liniei respectiv a materialului rulant. Fără a neglija confortul călătorilor și alte caracteristici privind mecanica mișcării, este oportun a se impune ca viteza unghiulară ( $\omega = \frac{v}{R}$ ) să fie limitată superior în loc de a se limita valoarea maximă a accelerației transversale

( $a_c$ ), pentru a preveni în curbele cu raza mică disconfortul călătorilor care circulă pe culoarul de trecere al vagoanelor.

S-a stabilit, în urma unor încercări experimentale (la DB, SNCF, MÀV etc. ) ca viteza unghiulară să nu depășească valoarea  $\omega_{\max} = 0,05$  [rad · s<sup>-1</sup>].

În cazul vitezelor maxime cuprinse între 40...80 km/h rămân neschimbați parametrii de bază ai curbelor de racordare și anume:

$$I = \frac{v^3}{R \cdot L} = 0,274 \text{ m/s}^3 \text{ și } I_{ct} = \frac{\gamma_t}{T} = 0,095 \text{ m/s}^3.$$

Pentru  $v \leq 40$  km/h, înclinarea maximă impusă rampei supraînălțării determină lungimea minimă a racordării ( $i_{\max} \rightarrow L_{\min}$ ).

Valorile determinate cu ajutorul datelor din tabelul 2.2 sunt extrem de prudente, exagerat de severe. Astfel au fost introduse supraînălțările reduse (supraînălțările limită sau minime). Totodată administrațiile feroviare din Germania, Franța etc. au sporit accelerația transversală necompensată la  $\gamma_t = 0,65 \text{ m/s}^2$ , insuficiența de supraînălțare la  $I = 100$  mm și supraînălțarea maximă la  $h_{\max} = 150$  mm.

La recomandarea UIC, administrațiile feroviare europene au trecut la modificarea instrucțiilor de proiectare, construcție și întreținere a căilor ferate în anii '80 (CFR în 1989).

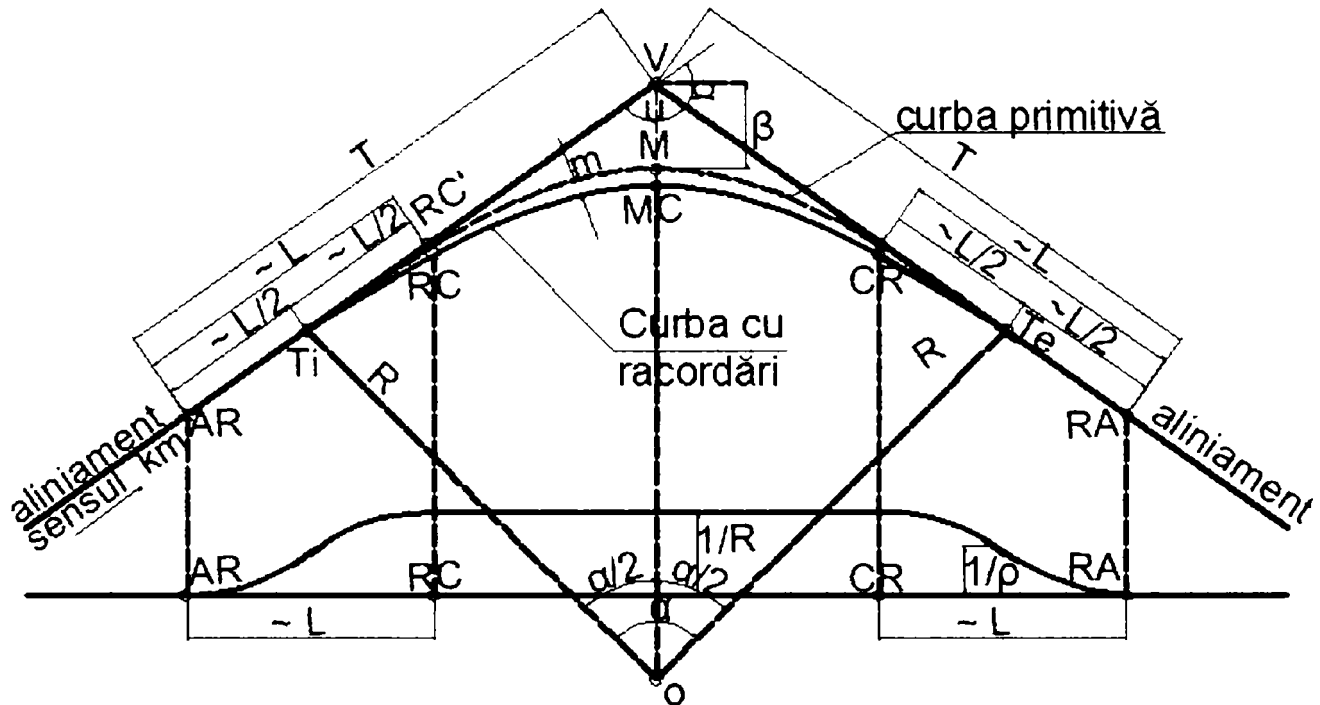
### 3. Racordări moderne

Curbele de racordare sunt astfel alcătuite, încât apariția și dispariția accelerației normale (deci a forței centrifuge) să se facă în mod continuu pe o anumită lungime  $L$  (fig. 2.11).

Mărimile principale ale unei curbe cu racordări sunt următoarele:

- vârful de unghi ( $V$ );

- mijlocul curbei (  $MC$  );
- punctele  $AR$  (aliniament – racordare),  $RC$  (racordare – cerc),  $CR$  (cerc – racordare),  $RA$  (racordare – aliniament).



*Fig. 2.11. Curbă prevăzută cu racordări.*

Punctele  $T_i$ ,  $T_e$  și  $M$  (fig. 2.11) au semnificația de la pct. 1.1 și se referă la arcul de cerc primitiv.

Mărimile principale ale unei curbe cu racordări sunt:

- raza arcului de cerc central (  $R$  );
- deplasarea arcului de cerc primitiv spre centrul curbei (  $m$  );
- unghiul de abatere (  $\alpha$  );
- unghiul la centru (  $U$  );
- lungimea tangentei (  $T = \overline{AR}, V = \overline{V}, RA$  );

- lungimea racordării (  $L$  ) considerată ca lungimea proiecției acesteia pe direcția aliniamentului;
- bisectoarea (  $B = VM$  );
- lungimea arcului de cerc central (  $L_c$  );

Amplasarea racordărilor se face simetric față de punctele  $T_i$  și  $T_e$ .

Deplasarea arcului de cerc central cu  $m$  duce la micșorarea razei cu aceeași valoare ( $R - m$ ), dar în calcule se poate considera mărimea  $R$  deoarece  $m$  are valori deosebit de mici în comparație cu raza.

Curbele de racordare îndeplinesc următoarele roluri principale:

- elimină apariția bruscă a accelerației normale;
- asigură un confort sporit;
- asigură introducerea supraînălțării și a supralărgirii.

Se menționează că în cazul vitezei  $v$  constante în expresia forței centrifuge

$\left( F_c = \frac{mv^2}{\rho} \right)$  și a accelerației normale  $\left( a_n = \frac{v^2}{\rho} \right)$ , singura variabilă este raza de

curbură ( $\rho$ ), deci  $F_c$  și  $a_n$  au aceleași legi de variație ca și curbura ( $1/\rho$ ).

### 3.1. Condiții pe care trebuie să le îndeplinească o curbă de racordare

În continuare, pentru simplificarea calculelor, studiul curbelor de racordare se face în plan (fig. 2.12).

Ordonatele curbei de racordare trebuie să varieze continuu și monoton de la  $y_{AR} = 0$  la  $y_{RC} = y_L$  pe lungimea  $L$  (fig. 2.12.1).

În punctul  $AR$  racordarea trebuie să aibă tangentă comună cu aliniamentul iar în punctul  $RC$  racordarea va avea tangentă comună cu arcul de cerc (fig. 2.12.2), adică:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=0} = y'_{AR} = 0 \quad (2.26)$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=x_{RC}=L} = y'_{x=x_{RC}=L} = \operatorname{tg}\varphi_L \quad (2.27)$$

Între punctele  $AR$  și  $RC$  variația  $\operatorname{tg}\varphi$  (sau a unghiului  $\varphi$ ) este continuă și monotonă ( $\operatorname{tg}\varphi \cong \varphi$ ).

Între punctele  $AR$  și  $RC$  accelerația normală (deci curbura) variază continuu și monoton de la:

$$\left(\frac{1}{\rho_x}\right)_{x=0} = (C_x)_{x=0} = \left(\frac{d\varphi}{dx}\right)_{x=0} = y''_{x=0} = 0 \quad (2.28)$$

la valoarea:

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_{x=x_{RC}} = y''_{x_{RC}=L} = \frac{1}{R} \quad [m^{-1}] \quad (2.29)$$

În majoritatea cazurilor supraînălțarea se introduce pe lungimea curbei de racordare și este proporțională cu valoarea accelerației normale, adică proporțională cu valoarea curburii. Rezultă că supraînălțarea  $h$  și curbura  $1/\rho$  au aceleași legi de variație (fig. 2.12.3). În cazul liniilor cu viteză sporită de circulație se impune ca șina de pe firul exterior în punctele  $AR$  și  $RC$  să aibă tangentă comună cu firul de șină nesupraînălțat (punctul  $AR$ ) și supraînălțat (punctul  $RC$ ) (fig. 2.12.4):

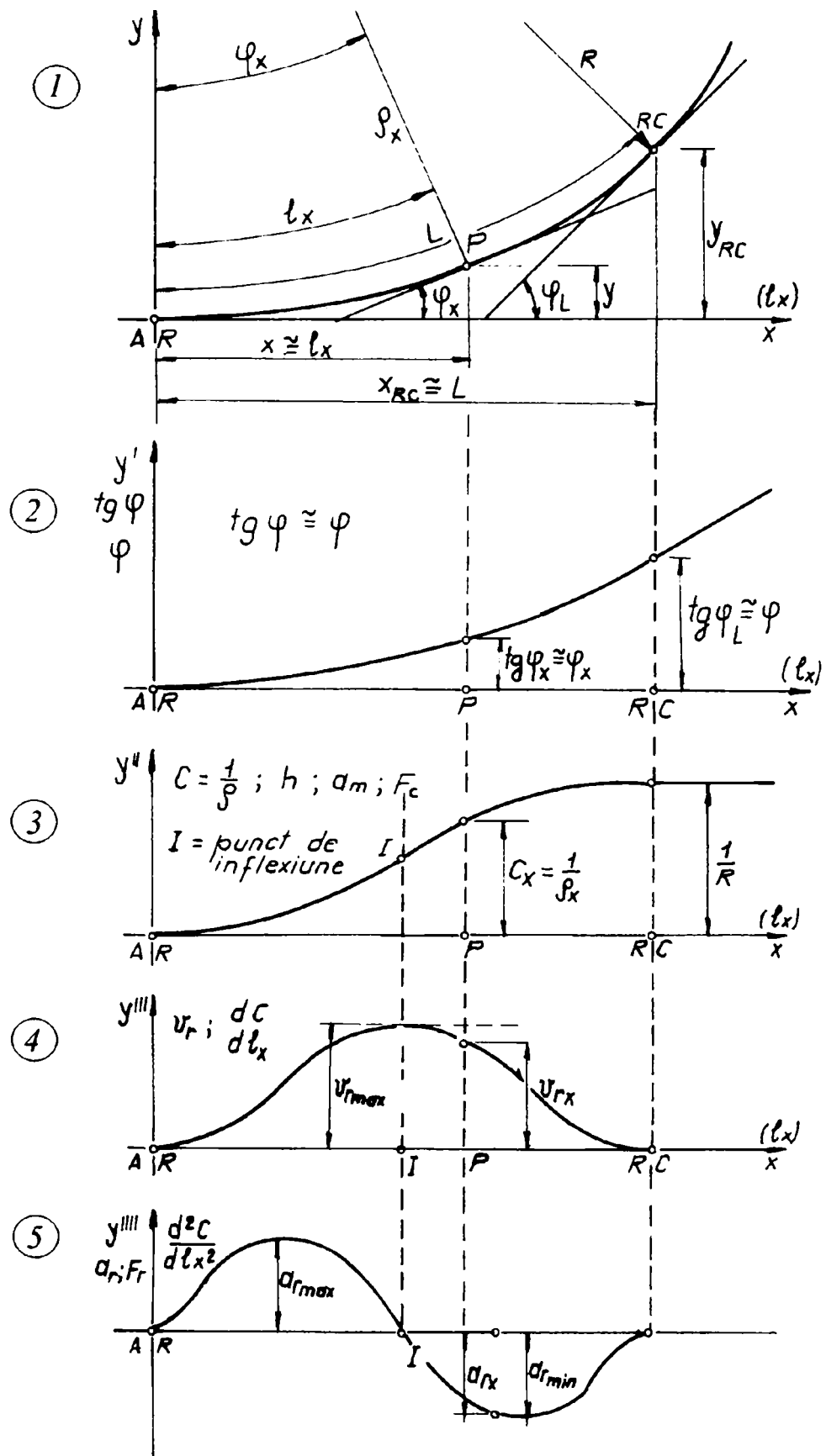


Fig. 2.12. Condiții pe care trebuie să le îndeplinească o curbă de racordare.



$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_{x=x_{RC}} = \left[\frac{d(kC_x)}{dx}\right]_{x=0} = (ky''')_{x=0} = 0 \quad (2.30)$$

$$\left(\frac{dh_x}{dx}\right)_{x=x_{RC}} = (ky''')_{x_{RC}=L} = 0 \quad (2.31)$$

Ultima condiție, impusă numai pentru curbele de grad superior, folosite la viteze mari, impune ca accelerația de ridicare a roții pe firul exterior ( $a_n$ ) să nu apară brusc, să fie zero în punctele  $AR$  și  $RC$  iar pe lungimea rampei ( $L$ ) să varieze continuu (fig. 2.12.5):

$$\left(\frac{d^2h_x}{dx^2}\right)_{x=0} = \left[\frac{d^2(kC_x)}{dx^2}\right]_{x=0} = (ky''')_{x=0} = 0 \quad (2.32)$$

$$\left(\frac{d^2h_x}{dx^2}\right)_{x=x_{RC}} = \left[\frac{d^2(kC_x)}{dx^2}\right]_{x_{RC}=L} = (ky''')_{x_{RC}=L} = 0 \quad (2.33)$$

### 3.2. Geometria curbilor de racordare în plan orizontal

Geometria curbilor de racordare în plan orizontal este determinată de variația curburii. În funcție de gradul de confort impus și viteza maximă, cele mai utilizate racordări au variația curburii:

- liniară;
- parabolică (gr. 2);
- sinusoidală;
- cosinusoidală.

### 3.2.1. Variația liniară a curburii

În cazul variației liniare a curburii ( $C_l = l/\rho_l$ ), aceasta este direct proporțională cu lungimea racordării ( $L$ ). Funcția care descrie variația curburii este (fig. 2.13):

$$\frac{1}{\rho_l} = C_l = \frac{l}{R \cdot L} \quad [m^{-1}] \quad (2.34)$$

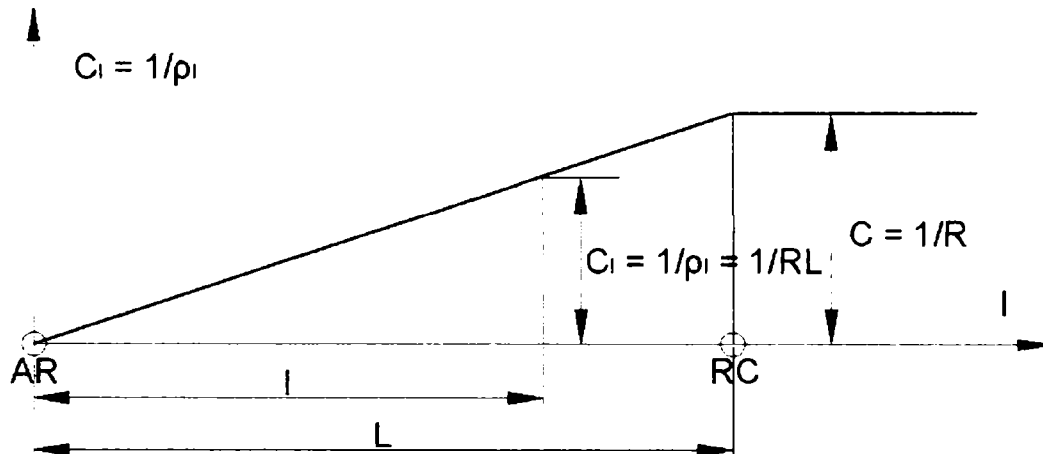


Fig. 2.13. Variația liniară a curburii.

Se observă că diagrama curburii prezintă coturi (frânturi) în punctele  $AR$  și  $RC$ .

### 3.2.2. Variația parabolică a curburii

În cazul variației parabolice diagrama curburii se compune din două parabole de gradul 2, simetrice, legate printr-un punct de inflexiune  $I$  (fig. 2.14).

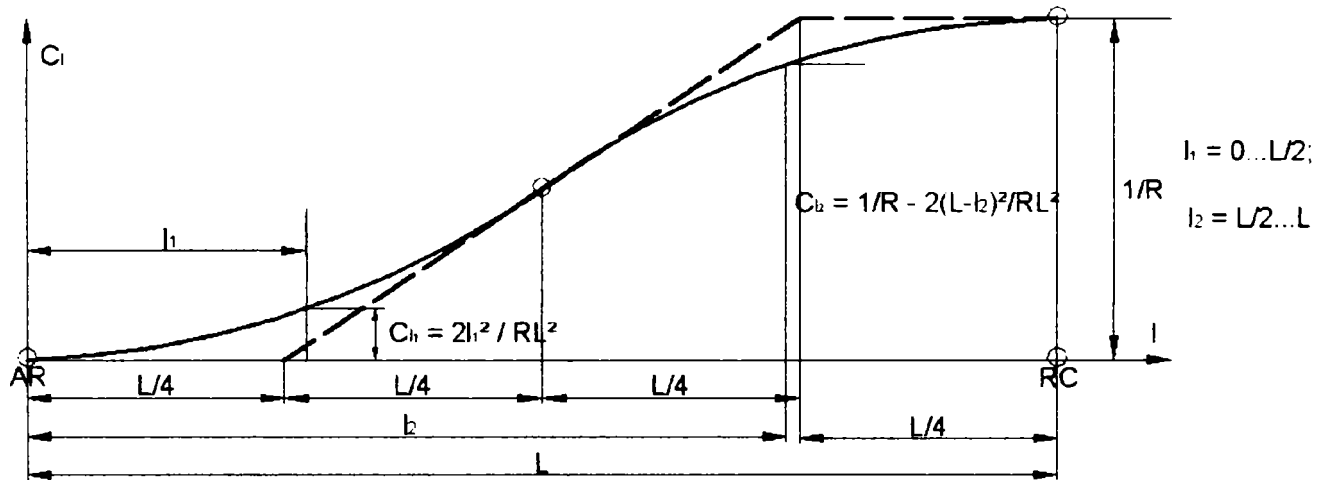
Pentru prima jumătate a diagramei (ramura  $\overline{AR, I}$ ) se poate scrie:

$$\left( \frac{1}{\rho_l} \right)_{0 \leq l_1 \leq \frac{L}{2}} = (C_l)_{0 \leq l_1 \leq \frac{L}{2}} = \frac{2}{R \cdot L^2} \cdot l_1^2 \quad [m^{-1}] \quad (2.35)$$

Pentru a doua jumătate a diagramei curburii este valabilă relația:

$$\left(\frac{1}{\rho_{l_2}}\right)_{L/2 \leq l_2 \leq L} = (C_{l_2})_{L/2 \leq l_2 \leq L} = \frac{1}{R} - \frac{2}{R \cdot L^2} (L - l_2)^2 \quad [m^{-1}] \quad (2.36)$$

În punctele *AR* și *RC* (fig. 2.14) tangentele sunt unice (diagrama nu prezintă frânturi).



*Fig. 2.14. Variația parabolică a curburii.*

### 3.2.3. Variația sinusoidală a curburii

Folosind notațiile din fig. 2.15., diagrama curburii are o componentă liniară și alta sinusoidală:

$$\frac{1}{\rho_1} = C_1 = \frac{1}{R \cdot L} - c \sin \frac{2\pi \cdot l}{L} \quad [m^{-1}] \quad (2.37)$$

Se observă că în punctul *AR* ( $l = 0$ ) se poate scrie relația:

$$\frac{dC_1}{dl} = 0 \quad (2.38)$$

Rezultă:

$$c = \frac{1}{2\pi \cdot R} \quad (2.39)$$

$$C_1 = \frac{1}{R \cdot L} - \frac{1}{2\pi \cdot R} \sin \frac{2\pi \cdot l}{L} \quad [m^{-1}] \quad (2.40)$$

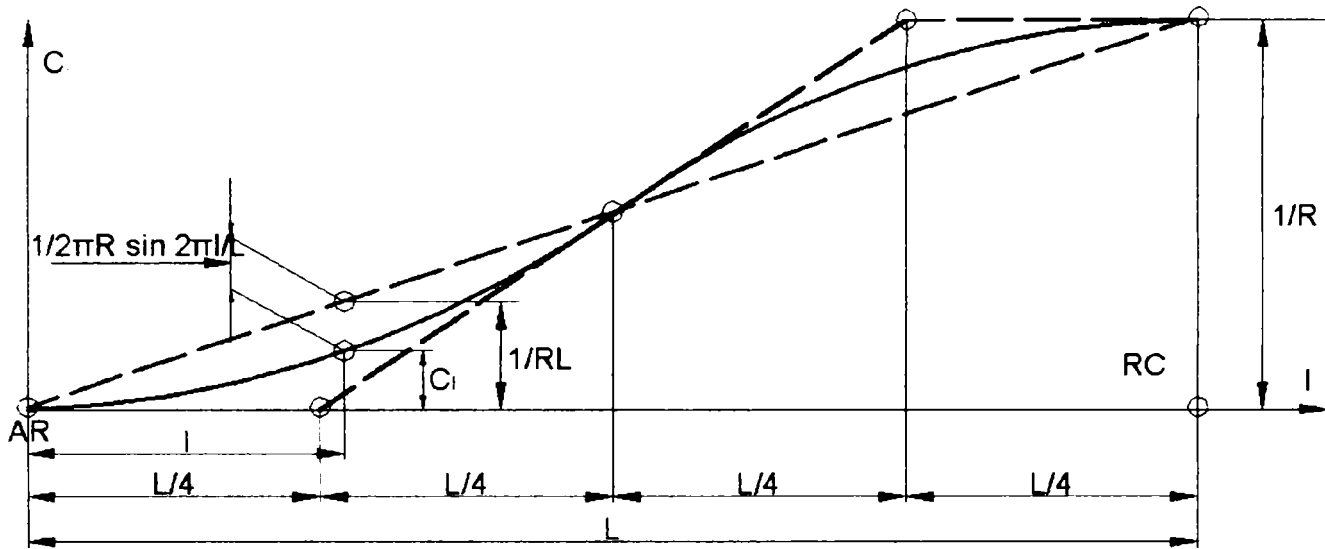


Fig. 2.15. Variația sinusoidală a curburii.

### 3.2.4. Variația cosinusoidală a curburii

Funcția care descrie diagrama curburii (fig. 2.16) este:

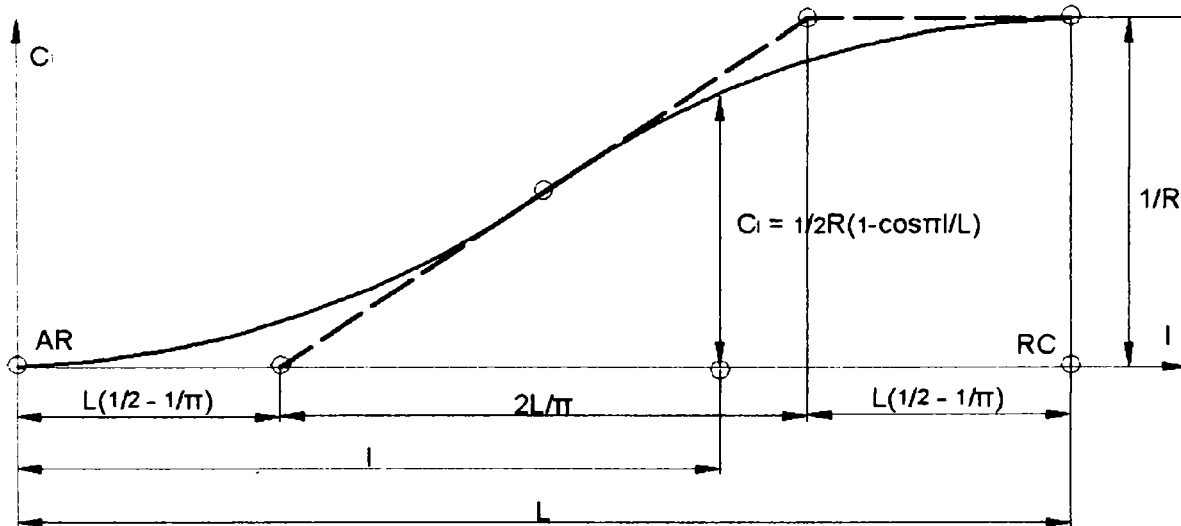


Fig. 2.16. Variația cosinusoidală a curburii.

$$\frac{1}{\rho_1} = C_1 = c \left( 1 - \cos \frac{\pi \cdot l}{L} \right) \quad (2.41)$$

Constanta  $c$  se determină din condițiile:

$$(C_1)_{l=0} = 0 \quad ; \quad (C_R)_{R=L} = \frac{1}{R}$$

și rezultă:

$$c = \frac{1}{2R} \quad (2.42)$$

$$C_1 = \frac{1}{2R} \left( 1 - \cos \frac{\pi \cdot l}{L} \right) \quad [m^{-1}] \quad (2.43)$$

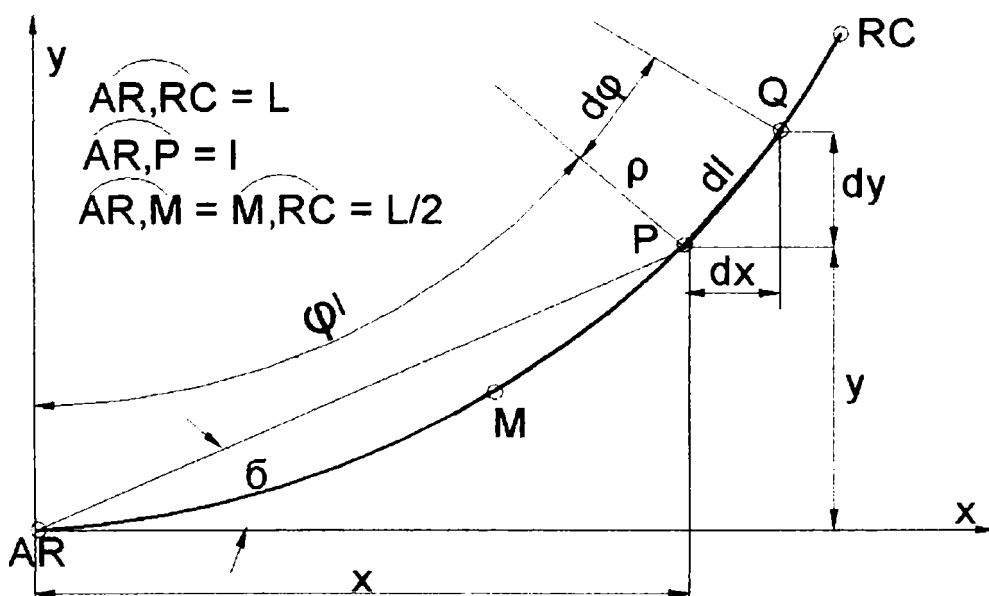
### 3.3. Racordarea unui aliniament cu o curbă circulară

Geometria unei curbe de racordare este determinată de variația curburii ( $C_l = 1/\rho$ ) în lungul racordării de lungime  $L$ :

$$C_l = f(l) \quad (2.44)$$

Se determină unghiul  $\varphi_e$  (fig. 2.17) în funcție de variația curburii:

$$\varphi_1 = \int_0^l d\varphi = \int_0^l C_l dl \quad (2.45)$$



$$d\varphi = \frac{dl}{\rho} = C dl$$

$$dx = dl \cos \varphi_1$$

$$dy = dl \sin \varphi_1$$

Fig.2.17. Coordonatele punctelor unei racordări.

Coordonatele rectangulare ale unui punct  $P$  de pe racordare pot fi determinate cu relațiile:

$$x = \int_0^x dx = \int_0^l \cos \varphi_1 dl \quad (2.46)$$

$$y = \int_0^y dy = \int_0^l \sin \varphi_1 dl \quad (2.47)$$

Pentru rezolvarea integralelor 2.46 și 2.47 se utilizează formula lui Simpson respectiv dezvoltările în serie. Intervalul  $[0, l]$  se împarte în  $2n$  părți egale, fiecare având lungimea  $h = l/2n$ . Coordonatele rectangulare se determină astfel:

$$x = \int_0^l \cos \varphi_1 dl \cong \frac{h}{3} [\cos \varphi_0 + \cos \varphi_{2n} + 4(\cos \varphi_1 + \cos \varphi_3 + \dots + \cos \varphi_{2n-1}) + 2(\cos \varphi_2 + \cos \varphi_4 + \dots + \cos \varphi_{2n-2})] \quad (2.48)$$

$$y = \int_0^l \sin \varphi_1 dl \cong \frac{h}{3} [\sin \varphi_0 + \sin \varphi_{2n} + 4(\sin \varphi_1 + \sin \varphi_3 + \dots + \sin \varphi_{2n-1}) + 2(\sin \varphi_2 + \sin \varphi_4 + \dots + \sin \varphi_{2n-2})] \quad (2.49)$$

Prin dezvoltarea în serie a funcțiilor  $\sin \varphi_1$  și  $\cos \varphi_1$  rezultă:

$$x = \int_0^l \cos \varphi_1 dl = \int_0^l \left( 1 - \frac{\varphi_1^2}{2!} + \frac{\varphi_1^4}{4!} - \dots \right) dl \quad (2.50)$$

$$y = \int_0^l \sin \varphi_1 dl = \int_0^l \left( \varphi_1 - \frac{\varphi_1^3}{3!} + \frac{\varphi_1^5}{5!} - \dots \right) dl \quad (2.51)$$

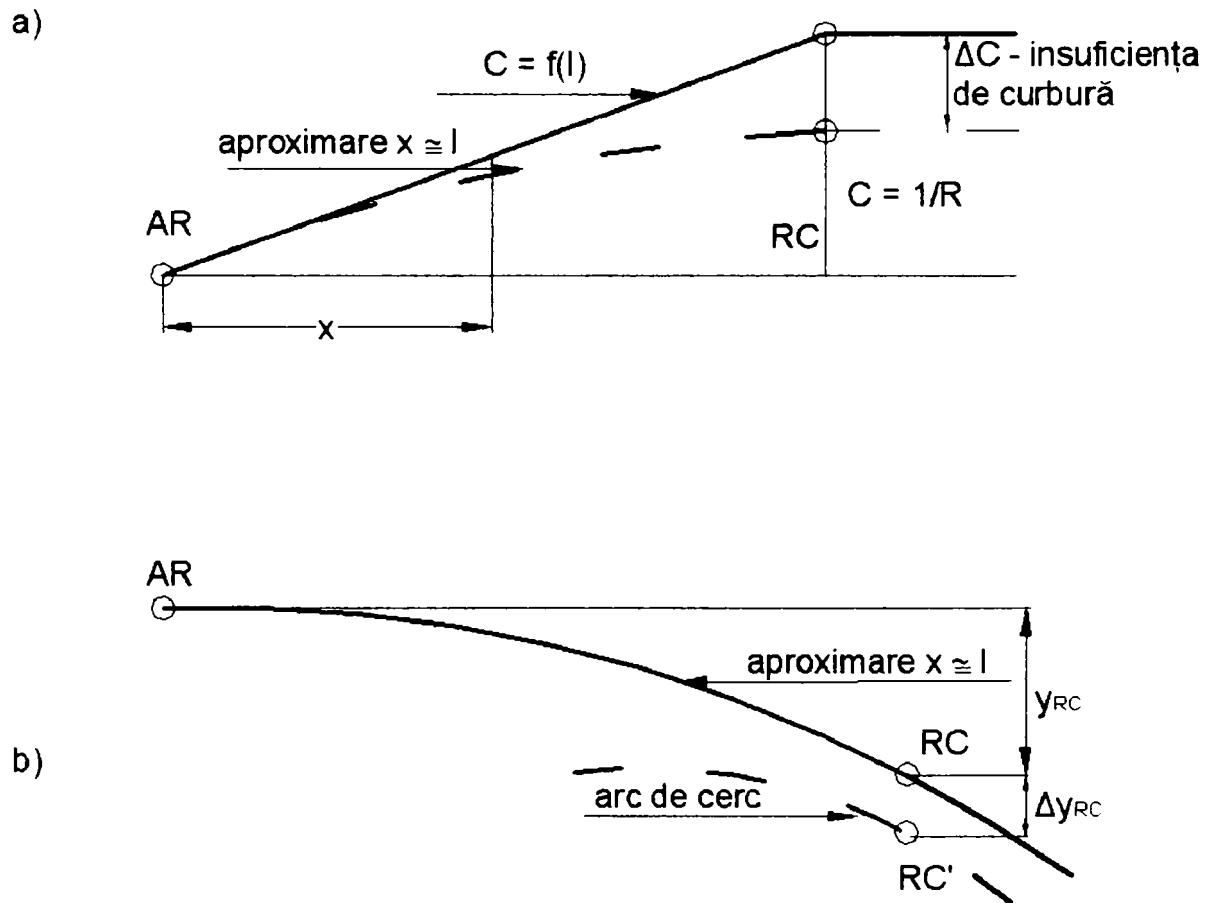
Dacă se iau în considerare doar primii termeni din relațiile 2.50 și 2.51, se obține o funcție  $z = f(x)$  care aproximează curba de racordare. Rezultă:

$$x \cong l \quad (2.52)$$

$$y = \int_0^x \varphi_x dx \quad (2.53)$$

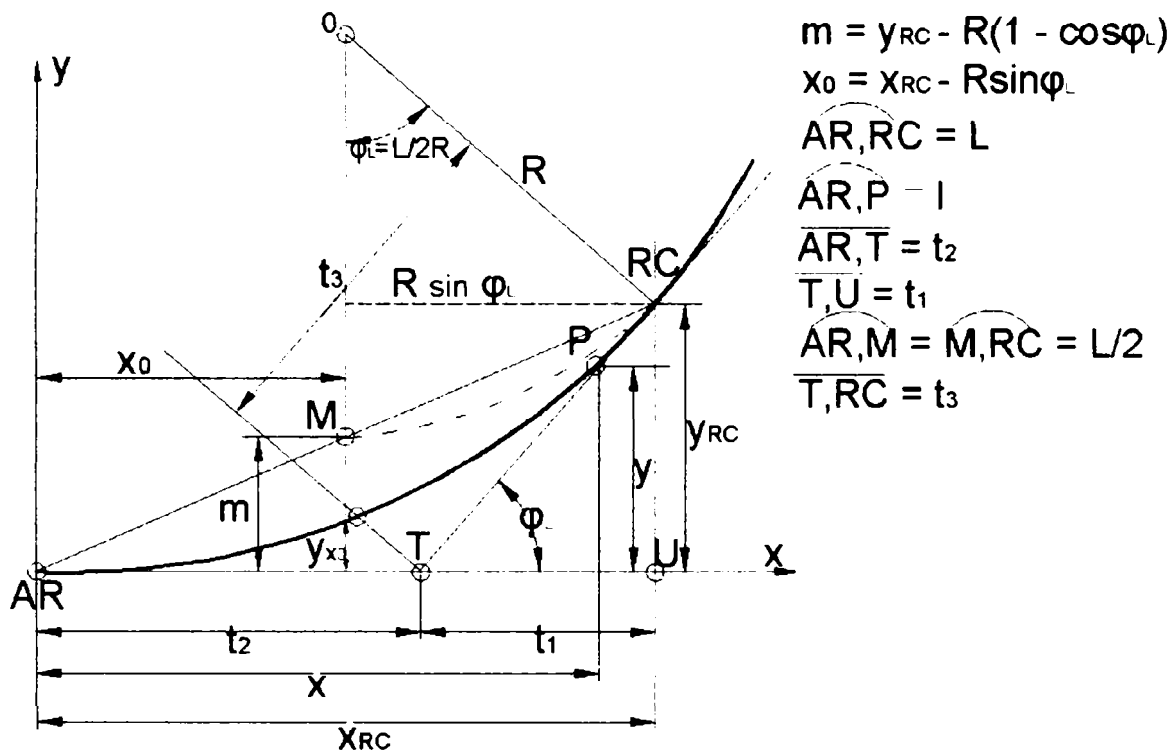
Sunt comise astfel următoarele greșeli:

- în punctul  $RC$  (fig. 2.18.a) curbura scade (raza de curbură crește) deoarece în loc de lungimea reală a racordării se ia în considerare doar proiecția acesteia pe abscisă;
- în același punct  $RC$  (fig. 2.18.b) rezultă o eroare la calculul ordonatei (la determinarea deplasării arcului de cerc central cu  $m$ ).



**Fig. 2.18.** Greșeli în calculul aproximativ al racordărilor.

În figura 2.19 sunt prezentate câteva elemente geometrice necesare pentru trasarea unei curbe de racordare.



**Fig. 2.19.** Elemente geometrice necesare pentru trasarea unei racordări.

$$m = y_{RC} - (R - R \cos\varphi_L) \quad [m] \quad (2.54)$$

$$x_0 = x_{RC} - R \sin\varphi_L \quad [m] \quad (2.55)$$

$$t_1 = y_{RC} \operatorname{ctg}\varphi_L \quad [m] \quad (2.56)$$

$$t_2 = x_{RC} - t_1 \quad [m] \quad (2.57)$$

$$t_3 = y_{RC} \operatorname{cosec}\varphi_L \quad [m] \quad (2.58)$$

Sunt prezentate în continuare câteva tipuri de racordări.

### 3.3.1. Parabola cubică

Parabola cubică rezultă din condiția: curbura variază liniar și direct proporțional cu lungimea racordării. Rezultă:

$$\varphi_1 = \int_0^l C_1 dl = \int_0^l \frac{1}{R \cdot L} dl = \frac{l^2}{2 \cdot R \cdot L} \quad (2.59)$$

$$\varphi_L = \frac{L^2}{2 \cdot R \cdot L} = \frac{L}{2 \cdot R} \quad (2.60)$$



Coordonatele carteziene se calculează cu relațiile 2.50 ; 2.51 și 2.59 (fig.

2.17) pentru  $l \in [0 \dots L]$ :

$$x = \int_0^l \cos \varphi_1 dl = l - \frac{l^5}{40(RL)^2} + \frac{l^9}{3456(RL)^4} - \frac{l^{13}}{599040(RL)^6} + \dots \quad (2.61)$$

$$y = \int_0^l \sin \varphi_1 dl \cong \frac{l^3}{6RL} - \frac{l^7}{336(RL)^3} + \frac{l^{11}}{42240(RL)^5} - \frac{l^{15}}{9676800(RL)^7} + \dots \quad (2.62)$$

Dacă se admite că  $x \cong l$ , rezultă funcția:

$$y = \int_0^x \varphi_x dx = \int_0^x \frac{x^2}{2RL} dx = \frac{x^3}{6RL} \quad [m] \quad (2.63)$$

care corespunde unei parabole de gradul 3 și poate fi utilizată în locul clotoidei numai pentru racordări scurte. Ordonata finală corespunzătoare parabolei de gradul 3 este:

$$y_{RC} = \frac{L^2}{6R} \quad [m] \quad (2.64)$$

Arcul de cerc central se deplasează spre centrul curbei cu:

$$m = y_{RC} - \frac{L^2}{8R} = \frac{L^2}{24R} \quad [m] \quad (2.65)$$

### 3.3.2 Parabola de gradul 4

Determinarea ecuației parabolei de gradul 4 se face separat pe sectoarele  $\overline{AR, M}$  ( $0 \leq l_1 \leq L/2$ ) și  $\overline{M, RC}$  ( $L/2 \leq l_2 \leq L$ ).

Utilizând notațiile din fig. 2.20, pentru prima jumătate a racordării se obține:

$$\varphi_{l_1} = \int_0^{l_1} C_1 dl = \frac{2}{RL^2} \int_0^{l_1} l^2 dl = \frac{2l_1^3}{3RL^2} \quad (2.66)$$

$$\varphi_{l=L/2} = \frac{2}{3RL^2} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^3 = \frac{L}{12R} \quad (2.67)$$

$$x_1 = \int_0^{l_1} \cos \varphi_{l_1} dl \cong l_1 - \frac{l_1^3}{31,5R^2L^4} + \frac{l_1^5}{1579,5R^4L^8} - \dots \text{ [ m ]} \quad (2.68)$$

$$y_1 = \int_0^{l_1} \sin \varphi_{l_1} dl \cong \frac{l_1^4}{6RL^2} - \frac{l_1^{10}}{202,5R^3L^6} + \frac{l_1^{16}}{14580R^5L^{10}} - \dots \text{ [ m ]} \quad (2.69)$$

A doua jumătate a parabolei de gradul 4 (fig. 2.20) se determină în sistemul de coordonate  $x_1My_1$ .

Prin translația sistemului de coordonate  $xARy$  în poziția  $x_1My_1$  devine posibilă utilizarea mai ușoară a dezvoltărilor în serie. În această situație:

$$l_2 = 0 \dots L/2 \quad (2.70)$$

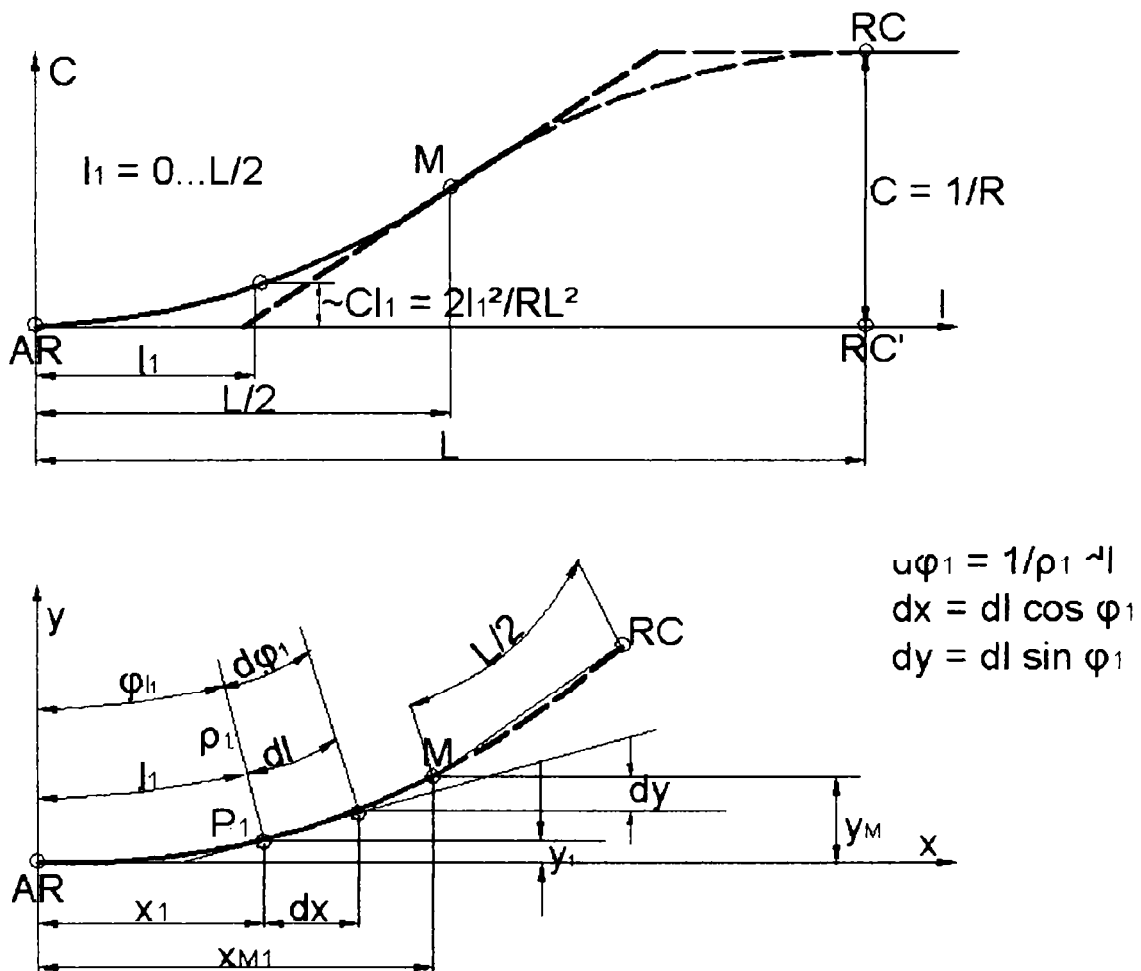


Fig. 2.20. Prima jumătate a parabolei de gradul 4.

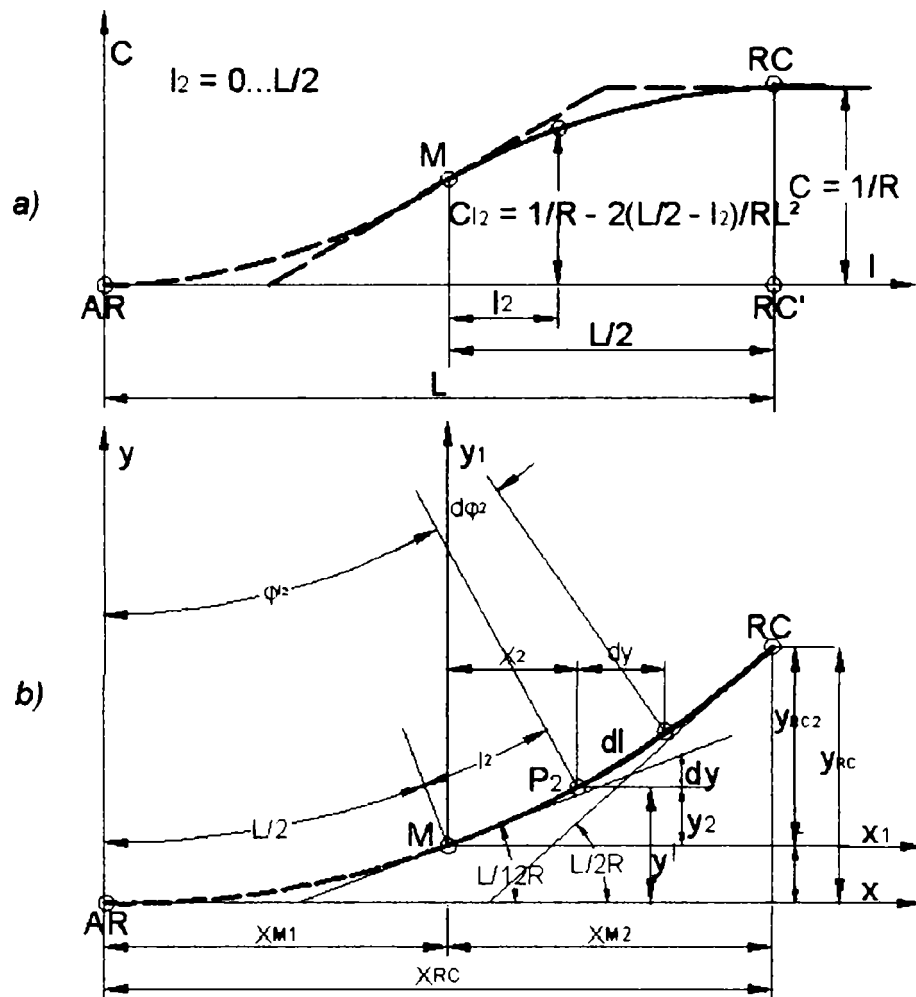


Fig. 2.21. A doua jumătate a parabolei de gradul 4.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \int_0^{l_1=L/2} C_1 dl + \int_0^{l_2} C_2 dl = \varphi_{1=L/2} + \int_0^{l_2} \left[ \frac{1}{R} - \frac{2}{RL^2} \left( \frac{L}{2} - l_2 \right)^2 \right] dl = \\ &= \frac{L}{12R} + \frac{l_2}{2R} + \frac{l_2^2}{RL} - \frac{2l_2^3}{3RL^2} \end{aligned} \quad (2.71)$$

Unghiul  $\varphi_1$  (în punctul RC) se determină în noul sistem de coordonate considerând  $l_1 = L/2$ :

$$\varphi_1 = \frac{L}{12R} + \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{2R} + \frac{L^2}{4} \cdot \frac{1}{RL} + \frac{2L^3}{8} \cdot \frac{1}{3RL^2} = \frac{L}{2R} \quad (2.72)$$

Coordonatele unui punct de pe a doua jumătate a parabolei de gradul 4 se determină în sistemul de coordonate  $x_1My_1$ , admițând că sunt suficienți primii doi termeni ai dezvoltărilor în serie din relațiile 2.50 și 2.51 ( $0 \leq l_2 \leq L/2$ ):

$$x_2 = \int_0^{l_2} \cos \varphi_{l_2} dl \cong \left(1 - \frac{L^2}{288R^2}\right) l_2 - \frac{L}{48R^2} l_2^2 - \frac{5}{72R^2} l_2^3 - \frac{l_2^4}{9R^2L} - \frac{l_2^5}{30R^2L^2} + \frac{l_2^6}{9R^2L^3} - \frac{l_2^7}{31,5R^2L^4} \quad [m] \quad (2.73)$$

$$y_2 = \int_0^{l_2} \sin \varphi_{l_2} dl \cong \left(\frac{L}{12R} - \frac{L^3}{10368R^3}\right) l_2 + \left(\frac{1}{4R} - \frac{L^2}{1152R^3}\right) l_2^2 + \left(\frac{1}{3RL} - \frac{L}{216R^3}\right) l_2^3 - \left(\frac{1}{6RL^2} - \frac{13}{864R^3}\right) l_2^4 - \frac{l_2^5}{36R^3L} - \frac{l_2^6}{54R^3L^2} + \frac{l_2^7}{47,25R^3L^3} + \frac{l_2^8}{36R^3L^4} - \frac{l_2^9}{40,5R^3L^5} + \frac{l_2^{10}}{202,5R^3L^6} \quad [m] \quad (2.74)$$

Admițând că  $l_1 = x_1$  și  $l_2 = x_2$  se obțin ecuațiile simplificite ale parabolei de gradul 4. Astfel, pentru prima jumătate a racordării (ramura  $AR, M$ ), se obține:

$$y_1 = \int_0^{x_1} \varphi_{x_1} dx = \frac{x_1^4}{6RL^2} \quad [m] \quad (2.75)$$

unde:

$$0 \leq x_1 \leq L/2$$

$$y_M = y_{x_1=L/2} = \frac{L^2}{96R} \quad [m] \quad (2.76)$$

Pentru a doua jumătate a racordării (ramura  $M, RC$ ), în sistemul de coordonate  $x_1My_1$ , se obține ( $0 \leq x_2 \leq L/2$ ):

$$y_2 = \int_0^{x_2} \varphi_{x_2} dx = \frac{L}{12R} x_2 + \frac{x_2^2}{4R} + \frac{x_2^3}{3RL} + \frac{x_2^4}{6RL^2} \quad [m] \quad (2.77)$$

Aceeași ordonată în sistemul de coordonate  $xARy$  devine:

$$y^{\text{II}} = y_{M1} + y_2 = \frac{L^2}{96R} + \frac{L}{12R} x_2 + \frac{x_2^2}{4R} + \frac{x_2^3}{3RL} + \frac{x_2^4}{6RL^2} \quad [m] \quad (2.78)$$

Dacă se folosește și abscisa corespunzătoare sistemului de coordonate  $xARy$

( $x_2 = x - L/2$ ), se obține:

$$y = \frac{L^2}{48R} + \frac{(x - L/2)^2}{2R} - \frac{(L - x)^4}{6RL^2} \quad [m] \quad (2.79)$$

unde:

$$L/2 \leq x \leq L$$

Se mai determină:

$$y_{RC} = y_{x=L} = \frac{L^2}{48R} + \frac{L^2}{4} \cdot \frac{1}{2R} = \frac{7L^2}{48R} \quad [m] \quad (2.80)$$

$$m = y_{RC} - \frac{L^2}{8R} = \frac{7L^2}{48R} - \frac{L^2}{8R} = \frac{L^2}{48R} \quad [m] \quad (2.81)$$

### 3.3.3. Racordarea sinusoidală

Se folosesc relațiile 2.37 și 2.40 și se determină:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \int_0^l C_1 dl = \frac{1}{R} \int_0^l \left( \frac{1}{L} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi l}{L} \right) dl = \\ &= \frac{1}{R} \left( \frac{l^2}{2L} - \frac{L}{4\pi^2} + \frac{L}{4\pi^2} \cos \frac{2\pi l}{L} \right) \end{aligned} \quad (2.82)$$

$$\varphi_L = \varphi_{l=L} = \frac{L}{2R} \quad (2.83)$$

$$\begin{aligned} x &= \int_0^l \cos \varphi_1 dl \cong l \left( 1 - \frac{3L^2}{64\pi^4 R^2} \right) + \frac{l^3}{24\pi^2 R^2} - \frac{l^5}{40R^2 L^2} - \frac{L}{16\pi^3 R^2} \left[ \frac{1L}{\pi} \cos \frac{2\pi l}{L} + \right. \\ &\quad \left. + \left( l^2 - \frac{L^2}{\pi^2} \right) \sin \frac{2\pi l}{L} + \frac{L^2}{16\pi^2} \sin \frac{4\pi l}{L} \right] \end{aligned} \quad [m] \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned}
y = \int_0^l \sin \varphi_1 dl \cong & l \left( \frac{5L^3}{768\pi^6 R^3} - \frac{L}{4\pi^2 R} \right) + l^3 \left( \frac{1}{RL} - \frac{L}{128\pi^4 R^3} \right) + \\
& + \frac{l^5}{160\pi^2 R^3 L} - \frac{l^7}{336 R^3 L^3} + \frac{\sin \frac{2\pi l}{L}}{8\pi^3 R} \left( L^2 - \frac{7L^4}{24\pi^4 R^2} + \frac{L^2 l^2}{2\pi^2 R^2} - \frac{l^4}{8R^2} \right) + \\
& + \frac{lL \cos \frac{2\pi l}{L}}{16\pi^4 R^3} \left( \frac{L^2}{\pi^2} - \frac{l^2}{2} \right) + \frac{L^2 \sin \frac{4\pi l}{L}}{512\pi^5 R^3} \left( \frac{5L^2}{8\pi^2} - l^2 \right) - \frac{lL^3 \cos \frac{4\pi l}{L}}{1024\pi^6 R^3} + \\
& + \frac{L^4 \sin^3 \frac{2\pi l}{L}}{2304\pi^7 R^3} \quad [m] \quad (2.85)
\end{aligned}$$

Se menționează că relațiile 2.84 și 2.85 au fost determinate utilizând doar primii doi termeni ai dezvoltării în serie 2.50 și 2.51.

Forma simplificată a racordării sinusoidale se determină prin integrarea expresiei 2.82 considerând  $l = x$ :

$$y = \int_0^x \varphi_x dx = \frac{x^3}{6RL} - \frac{L}{4R\pi^2} \left( x - \frac{L}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{L} \right) \quad [m] \quad (2.86)$$

în acest caz se obține:

$$y_{RC} = y_{x=L} = \frac{L^2}{R} \left( \frac{1}{6} - \frac{1}{4\pi^2} \right) \cong 0,14134 \frac{L^2}{R} \quad [m] \quad (2.87)$$

$$m = y_{RC} - \frac{L^2}{8R} \cong \frac{L^2}{61,21R} = 0,01634 \frac{L^2}{R} \quad [m] \quad (2.88)$$

### 3.4. Racordarea cosinusoidală

Cu notațiile din fig. 2.16 și relația 2.43 se obține:

$$\varphi_1 = \int_0^l C_1 dl = \frac{1}{2R} \int_0^l \left(1 - \cos \frac{\pi l}{L}\right) dl = \frac{1}{2R} \left(1 - \frac{L}{\pi} \sin \frac{\pi l}{L}\right) \quad (2.89)$$

$$\varphi_L = \varphi_{l=L} = \frac{L}{2R} \quad (2.90)$$

$$x = \int_0^l \cos \varphi_1 dl \cong l \left(1 - \frac{L^2}{16\pi^2 R^2}\right) - \frac{l^3}{24R^2} + \frac{L^3 \sin \frac{\pi l}{L}}{4\pi^3 R^2} + \frac{L^3 \sin \frac{2\pi l}{L}}{32\pi^3 R^2} - \frac{L^2 l \cos \frac{\pi l}{L}}{4\pi^2 R^2} \quad [\text{m}] \quad (2.91)$$

$$y = \int_0^l \sin \varphi_1 dl \cong -\frac{137L^4}{1152\pi^4 R^3} - \frac{L^2}{2\pi^2 R} + \frac{l^2}{4R} \left(1 - \frac{L^2}{16\pi^2 R^2}\right) - \frac{l^4}{192R^3} + \frac{L^2 \cos \frac{\pi l}{L}}{2\pi^2 R} \left(1 + \frac{5L^2}{24\pi^2 R^2} - \frac{l^2}{8R^2}\right) + \frac{L^4 \cos \frac{2\pi l}{L}}{128\pi^4 R^3} + \frac{L^3 l \sin \frac{\pi l}{L}}{8\pi^3 R^3} + \frac{L^3 l \sin \frac{2\pi l}{L}}{64\pi^3 R^3} + \frac{L^4 \cos^3 \frac{\pi l}{L}}{144\pi^4 R^3} \quad [\text{m}] \quad (2.92)$$

Ținând seama de precizia reală a instrumentelor de trasare și de condițiile de calitate privind geometria liniei, coordonatele  $x$  și  $y$  se pot determina utilizând doar primii doi termeni ai dezvoltării în serie 2.50 și 2.51.

$$y = \int_0^x \varphi_x dx = \frac{x^2}{4R} - \frac{L^2}{2\pi^2 R} \left(1 - \cos \frac{\pi x}{L}\right) \quad [\text{m}] \quad (2.93)$$

$$y_{RC} = y_{l=L} = \frac{L^2}{R} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2}\right) \cong 0,148679 \frac{L^2}{R} \quad [\text{m}] \quad (2.94)$$

$$m = y_{RC} - \frac{L^2}{8R} \cong \frac{L^2}{42,23R} = 0,0236789 \frac{L^2}{R} \quad [m] \quad (2.95)$$

#### 4. Supraînălțarea liniilor de cale ferată în curbe

S-a arătat că în curbe apare forța normală (centrifugă sau centripetă) respectiv accelerația normală (centrifugă sau centripetă) care, pentru un vehicul în mișcare având viteza constantă, se determină astfel:

$$F_n = \frac{m v^2}{\rho} = m v^2 C \quad [N] ; a_n = \frac{v^2}{\rho} = v^2 C \quad [m/s^2] \quad (2.96)$$

În curbele circulare având raza  $R$  [m] și viteza  $V$  [km/h] relațiile (2.96) devin:

$$F_n = \frac{m V^2}{13R} = \frac{m V^2}{13} C \quad [N] ; a_n = \frac{V^2}{13R} = \frac{V^2}{13} C \quad [m/s^2] \quad (2.97)$$

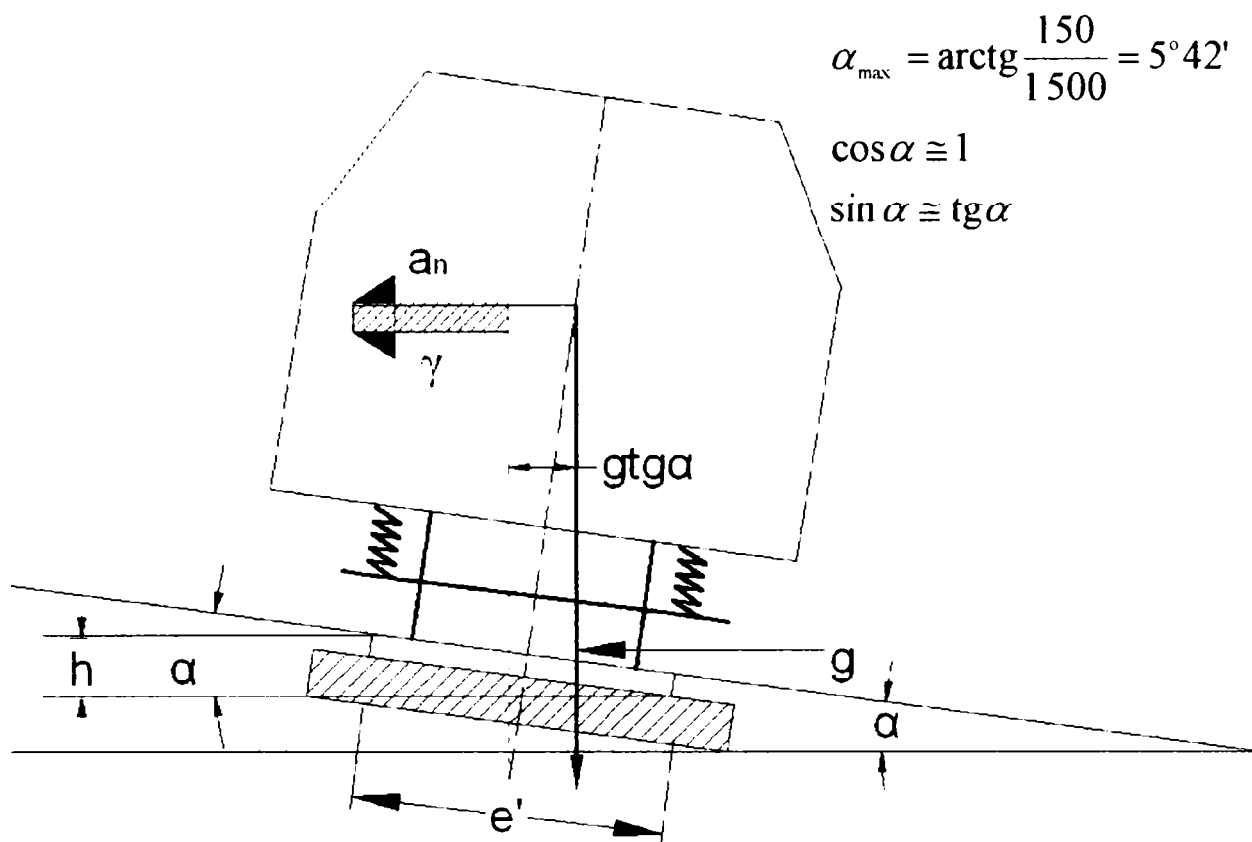
Supraînălțarea liniei de cale ferată se realizează pentru micșorarea efectului forței centrifuge. Firul exterior de șină se ridică față de firul interior cu valoarea  $h$  [mm] numită în continuare supraînălțare (fig. 2.22).

Se convine de la început că în loc de forțe ( $G$ ;  $F_c$ ;  $F_{cp}$ ;  $F_n$ ) să se lucreze cu accelerații ( $g$ ;  $a_c$ ;  $a_{cp}$ ;  $a_n$ ), eliminându-se masa  $m$ .

Prin proiectarea accelerațiilor  $g$  și  $a_c$  pe direcția paralelă cu podina vagonului (fixat rigid pe sistemul de rulare, deci paralelă la planul liniei) se obține accelerația transversală necompensată  $\gamma$ :

$$\gamma = a_c \cos \alpha - g \sin \alpha \quad [m/s^2] \quad (2.98)$$





$$\alpha_{\max} = \operatorname{arctg} \frac{150}{1500} = 5^{\circ} 42'$$

$$\cos \alpha \cong 1$$

$$\sin \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha$$

**Fig. 2.22.** Accelerații care acționează asupra unui vehicul de cale ferată în curbă.

Admițând  $\cos \alpha \cong 1$  și  $\sin \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha$ , se obține:

$$\gamma = a_c - g \operatorname{tg} \alpha \quad [ \text{m/s}^2 ] \quad (2.99)$$

În relația (2.99) se înlocuiește  $g = 9,81 [ \text{m/s}^2 ]$  și  $\operatorname{tg} \alpha = h/e'$  (unde  $e'$  este distanța între axele celor două fire de șină) și se obține:

$$\gamma = a_c - 9,81 \frac{h}{e'} \cong \frac{V^2}{13\rho} - 9,81 \frac{h}{1500} \cong \frac{V^2}{13\rho} - 9,81 \frac{h}{153} \quad [ \text{m/s}^2 ] \quad (2.100)$$

Accelerația transversală necompensată ( $\gamma_t$ ) acționează asupra călătorilor sau încărcăturii vagoanelor. În cazul vitezelor mari  $\gamma$  este pozitiv, acționează spre exteriorul curbei. Se poate vorbi deci de insuficiență (lipsă) de supraînălțare ( $I$ ). În cazul vitezelor mici  $\gamma$  este negativ, acționează către interiorul curbei și se poate vorbi despre exces de supraînălțare ( $E$ ).

Se amintește că au fost construite vagoane speciale (de ex. vagoanele germane GSt: Gleisbogenabhängige Wagenkastensteuerung) a căror podină se înclină suplimentar cu unghiul  $\beta$  ( $\beta_{max} \cong 10^\circ$ ) față de unghiul  $\alpha$  dat de supraînălțarea  $h$  (fig. 2.23). În această situație accelerația transversală necompensată se micșorează și se determină cu relația:

$$\gamma = a_c - g \sin(\alpha + \beta) \quad [ m/s^2 ] \quad ( 2.101 )$$

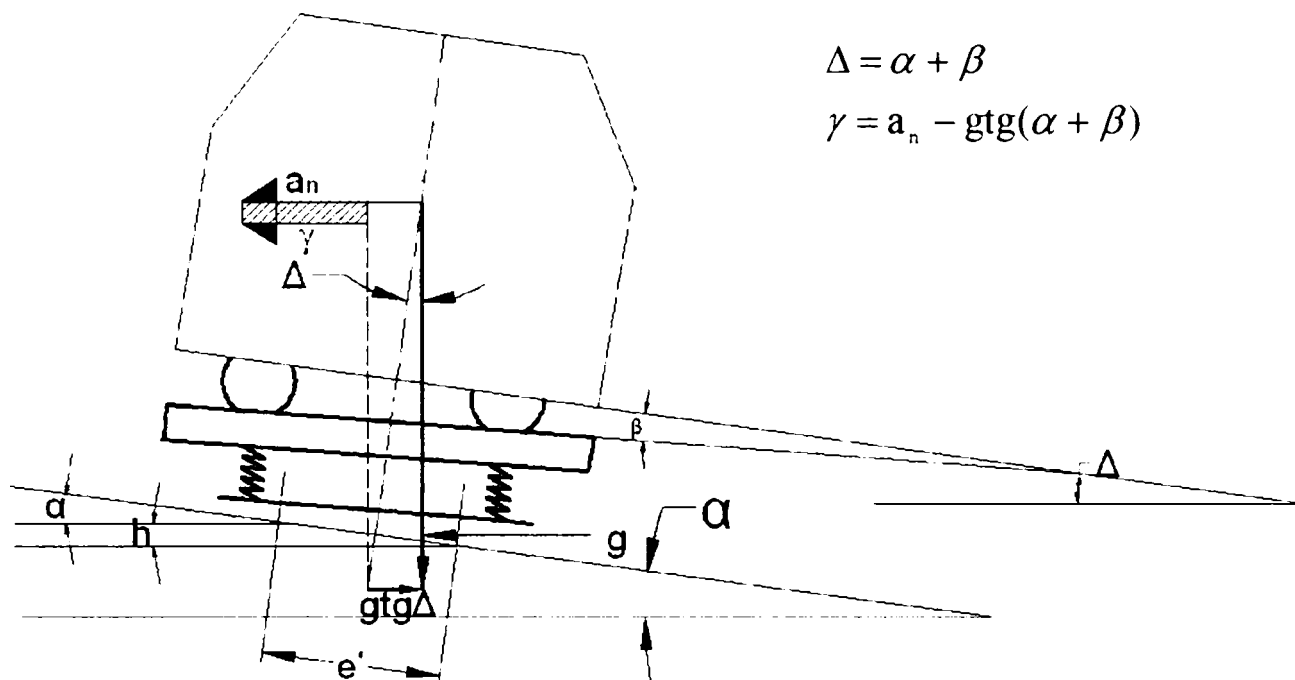


Fig. 2.23. Accelerații în cazul vagoanelor GSt.

Revenind la materialul rulant obișnuit, trebuie subliniat că prin comprimarea inegală a arcurilor valoarea efectivă a accelerației transversale necompensate sporește față de valoarea calculată cu relația 2.100 (fig. 2.24).

În cadrul unor încercări experimentale s-a stabilit că în vagoanele de călători care au circulat cu viteze de 140 ... 160 km/h, accelerația transversală necompensată a sporit cu  $\gamma' = 0,2 \dots 0,4 m/s^2$ , datorită comprimării inegale a arcurilor.

Din relația 3.5 pentru  $\gamma' = 0,65 m/s^2$  (valoare admisă) se obține:

$$h \cong 11,8 \frac{V^2}{\rho} - 153\gamma = 11,8V^2C - 100 \quad [\text{mm}] \quad (2.102)$$

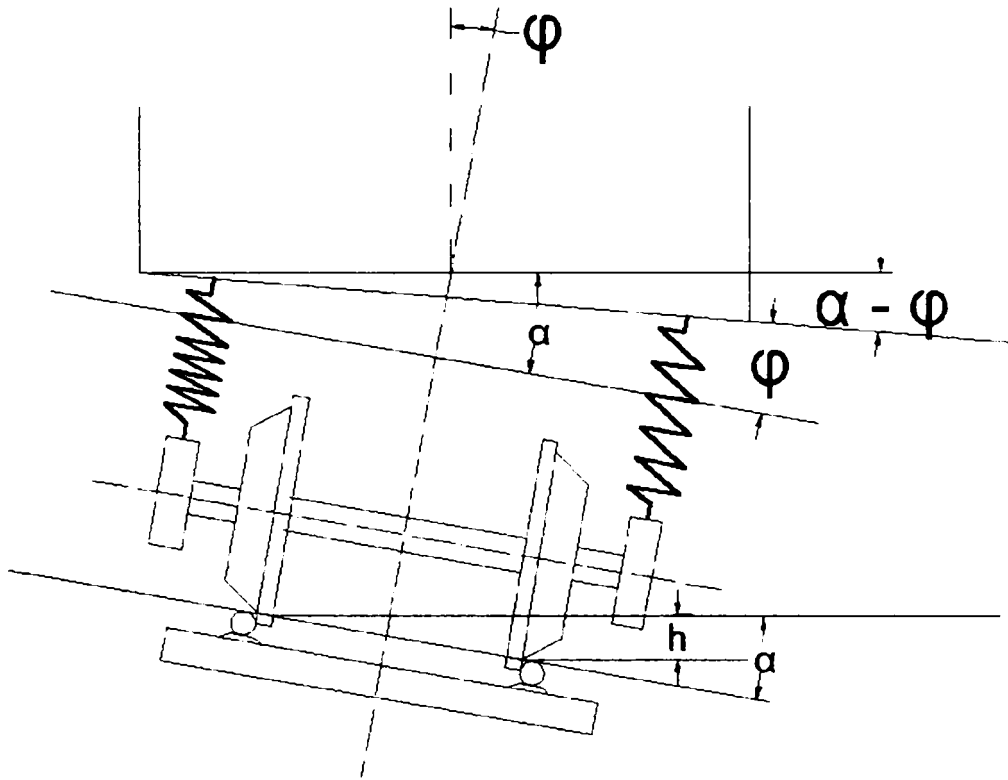


Fig. 2.24. Influența comprimării inegale a arcurilor.

Cea mai mare supraînălțare rezultă din condiția ca în vehiculul având  $V \rightarrow 0$ , accelerația transversală necompensată negativă limită să fie  $\gamma_{\min} = -1 \text{ m/s}^2$ :

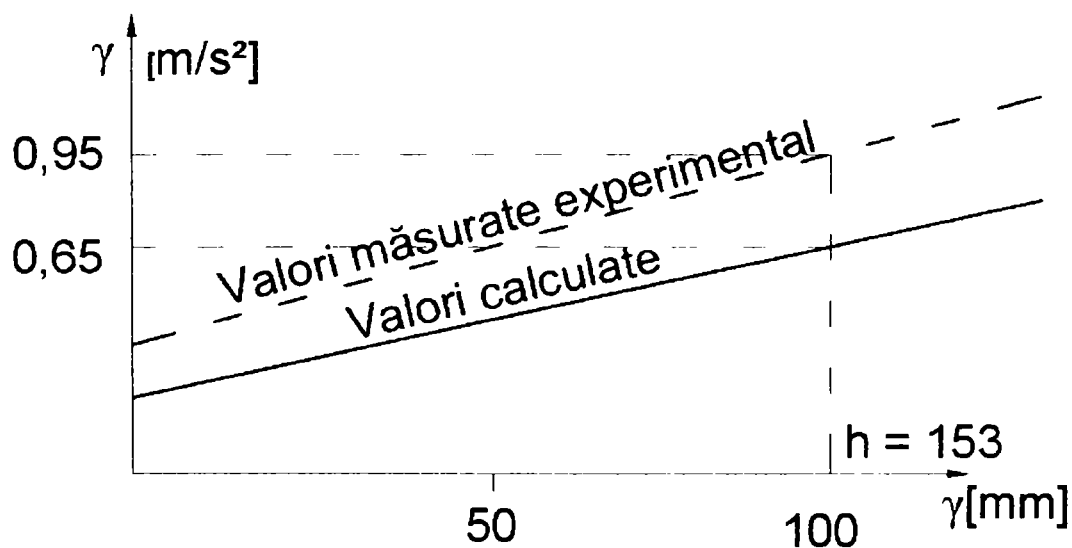
$$h_{\max \max} \cong 0 - 153(-1) \cong 150 \quad [\text{mm}] \quad (2.103)$$

Din punct de vedere practic calculele se complică, se introduc o serie de aproximații și se alterează speculațiile teoretice și din următoarele motive:

- deplasarea osiilor în raport cu cutia vagonului conduce la încărcări inegale ale șinelor;
- diferența (jocul)  $j$  dintre ecartament ( $e$ ) și distanța între flancurile exterioare ale buzelor bandajelor ( $d_2$ ) unei osii ( $j = e - d_2$ ) duce la încărcări inegale ale șinelor;
- un efect similar îl are și încărcarea excentrică a vagoanelor;

- neregularitățile căii (denivelări, torsionări etc) modifică ipotezele de calcul;
- forțele orizontale rezultate din mișcarea de șerpuire a vehiculelor și din acțiunea vântului lateral modifică accelerația  $\gamma$ ;
- circulația în convoi în curbă (prin acțiunea forțelor de tracțiune și a rezistențelor care se opun deplasării convoiului) încarcă suplimentar firul exterior al liniei și îl descarcă pe cel interior;
- uzurile (în special inegale) ale șinelor dar și cele ale bandajelor roților alterează calculele;
- condițiile de confort ale călătorilor și de stabilitate a încărcăturii în vagon depind de trepidații, vibrații;
- nu în ultimul rând, coeficienții de confort și siguranță sunt apreciați diferit de la o administrație la alta.

Rezultă că prin calcule se determină valorile limită ale supraînălțării  $h$  în diferite ipoteze de calcul, corelând valorile  $R$ ,  $h$ ,  $V$ ,  $I$ ,  $E$  etc. În fig. 2.25 sunt prezentate diagrame privind valorile calculate respectiv măsurate ale accelerației transversale necompensate  $\gamma$ .



*Fig. 2.25. Diagrame  $\gamma$ .*

În concluzie, supraînălțarea liniilor de cale ferată are următoarele efecte:

- prin micșorarea accelerației  $\gamma$  sporesc condițiile de confort ale călătorilor și cele de siguranță (stabilitate) ale mărfurilor transportate;
- scade pericolul de răsturnare a vehiculelor;
- se micșorează uzurile șinelor și ale bandajelor roților;
- încărcarea șinelor este mai echilibrată;
- mișcările materialului rulant sunt mai ordonate;
- se asigură stabilitatea vehiculelor la vitezele extreme  $V=V_{\max}$  și  $V=0$ .

#### 4.1. Calculul supraînălțării

Situația ideală corespunde condiției  $\gamma=0$ , deci pornind de la relația 2.102 se obține supraînălțarea teoretică ( $h_t$ ):

$$h_t = 11,8 \frac{V^2}{R} = 11,8 V^2 C \quad [ \text{mm} ] \quad ( 2.104 )$$

Această supraînălțare poate fi aplicată numai curbelor în care toate trenurile circulă cu aceeași viteză (de ex. la liniile de metro).

U.I.C. a stabilit următoarele tipuri de supraînălțări:

- supraînălțarea normală ( $h_n$ );
- supraînălțarea maximă ( $h_{\max}$ );
- supraînălțarea limită ( $h_{\lim}$ );
- supraînălțarea efectivă ( $h_{ef}$ ).

Supraînălțarea normală ( $h_n$ ) este cea mai mică supraînălțare ce se aplică în funcție de raza  $R$  [m], insuficiența de supraînălțare  $I$  [mm] și viteza maximă a trenurilor de călători  $V_{\max}$  [km/h] :

$$h_n = 11,8 \frac{V_{\max}^2}{R} - I \quad [ \text{mm} ] \quad ( 2.105 )$$

unde:

$$I = \frac{150}{1+S} \gamma_T \quad [ \text{mm} ]$$

în care:

- $S$  este coeficientul de suplețe al vehiculelor care, după normele UIC, are valoarea  $S_{\max} = 0,4$ ;
- $\gamma_T$  – accelerația transversală admisă  $[ \text{m/s}^2 ]$  și care poate fi  $\gamma_T = 0,65 \text{ m/s}^2$  sau excepțional  $\gamma_T = 0,85 \text{ m/s}^2$ .

Pentru  $S = 0,4$  și  $\gamma_T = 0,65 \text{ m/s}^2$  rezultă  $I = 70 \text{ mm}$ , iar pentru  $S=0,4$  și  $\gamma_T = 0,85 \text{ m/s}^2$  rezultă  $I = 90 \text{ mm}$ .

Supraînălțarea maximă ( $h_{\max}$ ) este cea mai mare supraînălțare ce se aplică în funcție de raza curbei ( $R$ ), viteza medie de circulație a trenurilor de marfă ( $V_{\text{med}}$ ), intensitatea traficului trenurilor de marfă pe zi ( $T_z$ ), excesul de supraînălțare admis ( $E$ ) și viteza maximă a trenurilor de călători ( $V_{\max}$ ).

$$h_{\max} = 11,8 \frac{V_{\text{med}}}{R} + E \quad [ \text{mm} ] \quad ( 2.106 )$$

unde:

$$V_{\text{med}} = \frac{n_1 V_1 + n_2 V_2 + \dots}{n_1 + n_2 + \dots} \quad [ \text{mm} ] \quad ( 2.107 )$$

în care  $n_1, n_2, \dots$  reprezintă numărul trenurilor de marfă care circulă cu viteza  $V_1, V_2, \dots$ .

$E = 50 \text{ mm}$  pentru  $T_z > 60\,000 \text{ t}$ ;

$E = 60 \text{ mm}$  pentru  $T_z = 30\,000 \dots 60\,000 \text{ t}$ ;

$E = 70 \text{ mm}$  pentru  $T_z \leq 30\,000 \text{ t}$ .

Supraînălțarea limită ( $h_{lim}$ ) este cea mai mare supraînălțare admisă în curbele având raza sub 300 m, fără contrașine la firul interior pentru prevenirea deraierii la demararea vehiculelor în aceste curbe.

$$h_{lim} = \frac{R - 50}{2} \quad [\text{mm}] \quad (2.108)$$

unde:

- $R$  este raza curbei circulare [ m ].

Supraînălțarea efectivă ( $h_{ef}$ ) este cea care se aplică în curbă:

$$h_n \leq h_{ef} \leq h_{max} \quad [\text{mm}] \quad (2.109)$$

sau:

$$h_n \leq h_{ef} \leq h_{lim} \quad [\text{mm}] \quad (2.110)$$

Supraînălțările  $h_n$ ,  $h_{max}$ , și  $h_{lim}$  sunt date în tabele.

### Observații:

Valorile limită ale supraînălțării ( $h_n$  și  $h_{max}$  se determină pe baza unor criterii de confort stabilite experimental. Astfel dacă:

$$-0,4 \leq \gamma \leq 0,4 \quad [\text{m/s}^2] \quad (2.111)$$

acelerația transversală nu este resimțită de către călători, iar dacă:

$$-0,65 \leq \gamma \leq 0,65 \quad [\text{m/s}^2] \quad (2.112)$$

acelerația transversală resimțită este acceptabilă.

Pornind de la relația 2.100, pentru  $\gamma_{max} = 0,65 \text{ m/s}^2$ , se obține:

$$\begin{aligned} 0,65 &= \frac{V_{max}^2}{13R} - \frac{h_n}{153} \quad \Rightarrow \quad 11,8 \frac{V_{max}^2}{R} - h_n \cong 100 \quad \Rightarrow \\ &\Rightarrow \quad h_n \cong h_t - 100 \quad [\text{mm}] \quad (2.113) \end{aligned}$$

## 4.2. Viteza maximă admisibilă și raza minimă

Viteza maximă admisibilă și raza minimă corespunzătoare unei viteze maxime date, pentru o curbă de cale ferată cu racordări se determină în funcție de  $y''$  și  $y'''$  (care au semnificațiile prezentate în cap. II.3). Curba circulară având raza  $R$  și supraînălțarea  $h$  constante se analizează împreună cu racordările având lungime  $L$ , pe care se realizează și rampa supraînălțării care are aceeași geometrie ca și diagrama curburii.

Din relația 2.105 rezultă:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{R}{11,8}(h + I)} \quad [ \text{km/h} ] \quad ( 2.114 )$$

Din aceeași relație rezultă:

$$R_{\min} = \frac{11,8 V^2}{h + I} \quad [ \text{m} ] \quad ( 2.115 )$$

## 4.3. Rampa supraînălțării

Realizarea practică a supraînălțării se face de obicei prin ridicarea firului exterior, dar se poate face și prin coborârea firului interior sau ridicarea firului exterior și coborârea firului interior. Această ultimă modalitate, aplicată pe unele linii din Elveția, Portugalia, Japonia etc. are avantajul că, modificând nivelul ambelor fire față de nivelul lor din aliniament, cu jumătate din valoarea supraînălțării, centrul de greutate al vagonului urmărește nivelul liniei, deci are o mișcare mai lină.

Lungimea pe care se trece de la supraînălțarea zero din aliniament la supraînălțarea  $h_{ef}$  din cuprinsul curbei circulare, poartă denumirea de rampa



supraînălțării. Pentru curbele prevăzute cu racordări, de regulă, rampa supraînălțării se suprapune peste lungimea racordării  $L$  iar variația supraînălțării pe lungimea rampei este aceeași cu variația curburii.

Înclinarea rampei (torsionarea liniei de cale ferată) se poate exprima cu relațiile (fig. 2.26):

$$n = \operatorname{ctg} \alpha \quad \text{sau} \quad 1:n = 1:\operatorname{tg} \alpha \quad (2.116)$$

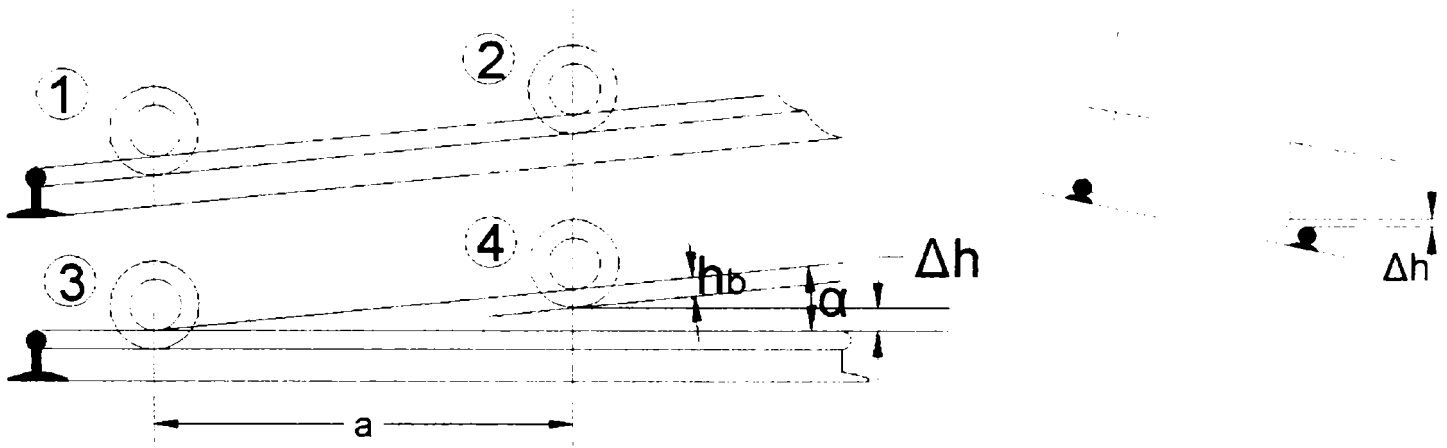


Fig. 2.26. Înclinarea rampei supraînălțării.

Se arată că pentru diminuarea vitezei respectiv accelerației de ridicare a roții pe firul exterior la liniile pentru viteze mari, se recomandă o înclinare cât mai mică a rampei, adică o lungime cât mai mare a acesteia. Trebuie totuși arătat că o torsionare prea mică a liniei nu este de dorit, deoarece supraînălțările efective pe lungimea rampei se realizează și se mențin în exploatare mai greu iar denivelările liniei în exploatare (în special în prima parte a racordării) pot duce la apariția unor zone cu denivelări consecutive alternative (chiar încrucișate).

Înclinarea maximă admisă a rampei depinde de:

- viteza maximă;
- partea rulantă (osii, boghiuri) a vehiculului;
- cutia vagonului;
- suspensia materialului rulant.

Folosind notațiile din fig. 2.26 rezultă:

$$n \leq \frac{1000 a}{h_{\text{bmin}}} = \frac{1000 a}{25} = 40 a \quad (2.117)$$

Determinant este vehiculul cu ampatamentul  $a$  maxim. În realitate, datorită suspensiei vagonului, roata 3 nu se ridică iar cele patru roți vor fi încărcate neuniform. Din această cauză cele mai multe administrații feroviare admit  $n = 400$ .

La liniile C.F.R.  $n = 400$  pentru  $V_{\text{max}} = 100 \dots 120 \text{ km/h}$  și  $n = 450$  pentru  $V_{\text{max}} > 120 \text{ km/h}$ .

#### 4.4. Rampa supraînălțării între aliniament și curba circulară

Se analizează în continuare următoarele tipuri de rampe ale supraînălțării între un aliniament și o curbă circulară:

- rampa liniară;
- rampa parabolică (rampa în S);
- rampa sinusoidală;
- rampa cosinusoidală.

Se folosesc următoarele notații:

- $l$  este distanța măsurată de la începutul rampei (AR) până la punctul studiat [m];
- $h_l$  – supraînălțarea în punctul studiat [mm];
- $h$  – supraînălțarea efectivă la sfârșitul rampei (RC) [mm];
- $L$  – lungimea rampei ( $\overline{AR, RC}$ ) [m].

#### 4.4.1. Rampa liniară

Înclinarea (panta) rampei este:

$$n = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1000L}{h} \text{ sau } l : n = \frac{l}{\frac{1000L}{h}} = \frac{h}{1000L} \quad (2.118)$$

Rampa prezintă frânturi în punctele AR și RC (fig. 2.27)

Variația supraînălțării este liniară:

$$h_1 = h \frac{l}{L} \quad [\text{mm}] \quad (2.119)$$

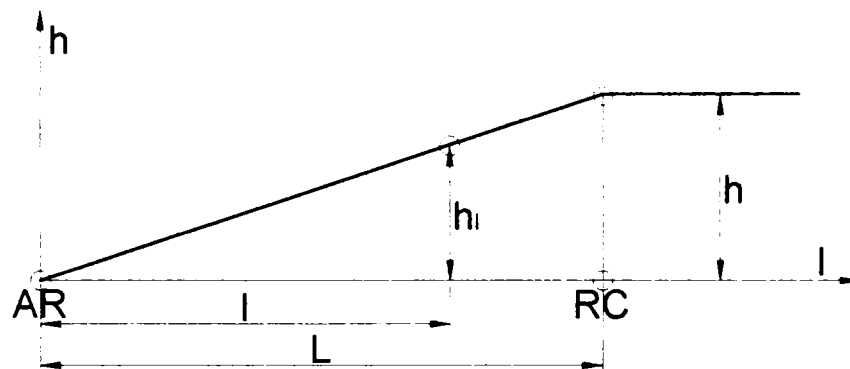


Fig. 2.27. Rampa liniară.

#### 4.4.2. Rampa parabolică

Rampa parabolică (în S) este prezentată în fig. 2.28:

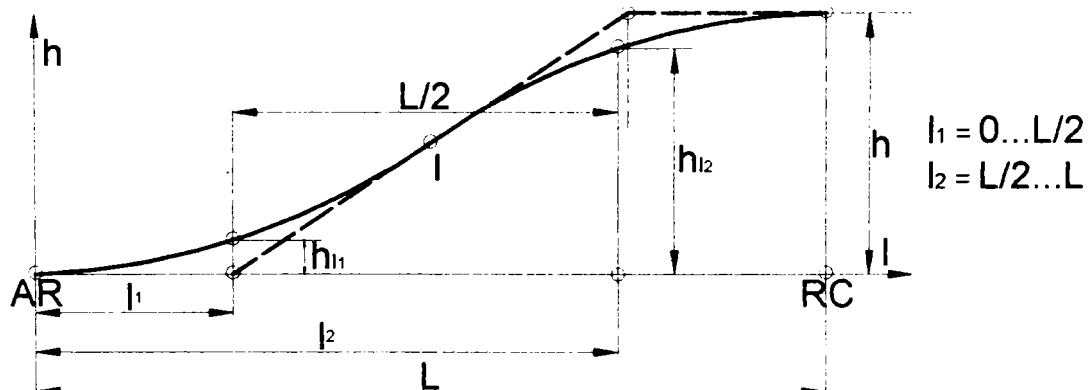


Fig. 2.28. Rampa parabolică.

Pentru  $0 \leq l_1 \leq 0,5L$  :

$$h_{l_1} = \frac{2hl_1^2}{L^2} \quad [ \text{mm} ] \quad ( 2.120 )$$

Pentru  $0,5L \leq l_2 \leq L$  :

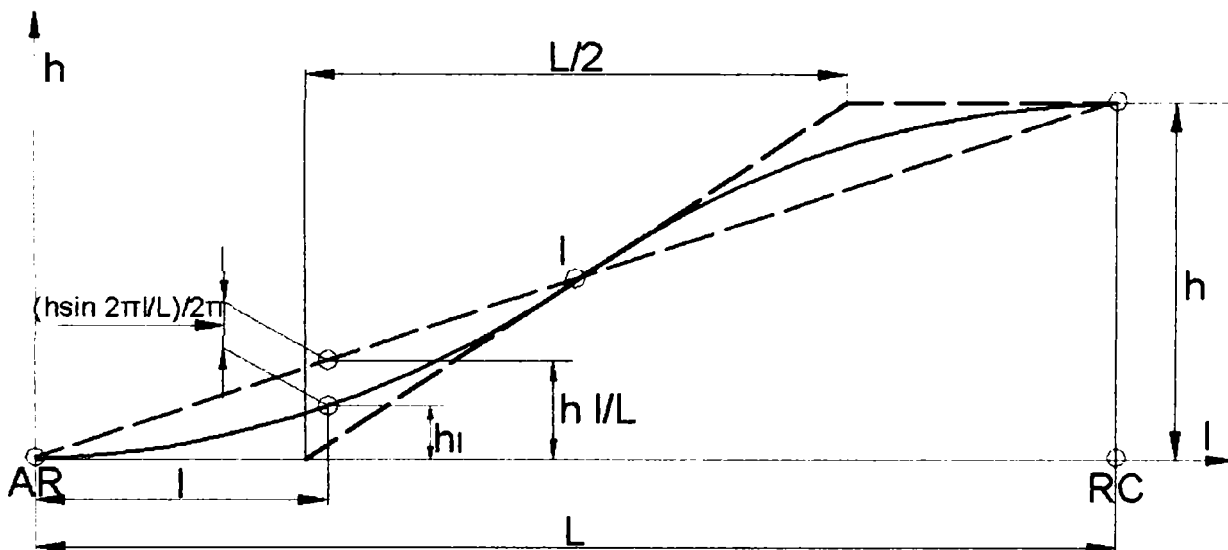
$$h_{l_2} = h - \frac{2h}{L^2}(L - l_2)^2 \quad [ \text{mm} ] \quad ( 2.121 )$$

Panta maximă a rampei este în punctul de inflexiune I:

$$n_1 = n_{l=L/2} = \frac{1000L}{2h} = 500 \frac{L}{h} \quad ( 2.122 )$$

#### 4.4.3. Rampa sinusoidală

Mărimile efective ale supraînălțării în cazul rampei sinusoidale se obțin prin însumarea unei funcții liniare cu o funcție sinusoidală (fig. 2.29):



*Fig. 2.29. Rampa sinusoidală.*

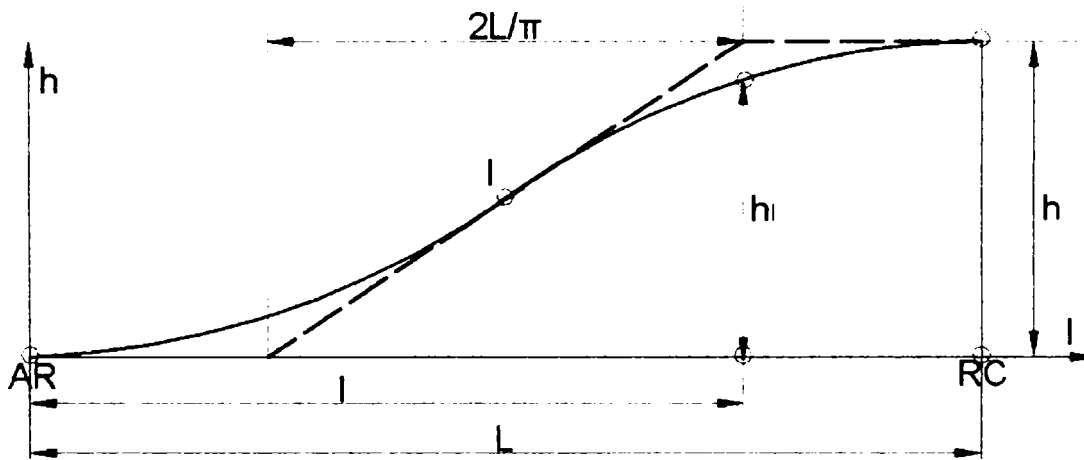
$$h_l = h \frac{l}{L} - \frac{h}{2\pi} \sin \frac{2\pi l}{L} \quad [ \text{mm} ] \quad ( 2.123 )$$

Panta maximă a rampei este în punctul de inflexiune I:

$$n_1 = n_{l=L/2} = \frac{1000L}{2h} = 500 \frac{L}{h} \quad (2.124)$$

#### 4.4.4. Rampa cosinusoidală

Rampa cosinusoidală este prezentată în fig. 2.30.



*Fig. 2.30. Rampa cosinusoidală.*

$$h_1 = \left(1 - \cos \frac{\pi l}{L}\right) \frac{h}{2} \quad [ \text{mm} ] \quad (2.125)$$

Panta maximă a rampei este în punctul de inflexiune I:

$$n_1 = n_{l=L/2} = \frac{2000L}{\pi h} \cong 636,62 \frac{L}{h} \quad (2.126)$$

#### Observație:

În cazul rampelor parabolice, sinusoidale și cosinusoidale, în punctele *AR* și *RC* firul exterior are tangentă comună cu rampa supraînălțării.

#### 4.5. Analiza comparativă a rampelor supraînălțării studiate

Pentru analiza comparativă a rampelor supraînălțării studiate (rampa liniară, rampa parabolică, rampa sinusoidală și rampa cosinusoidală) se consideră doar caracteristicile mișcării vehiculului în plan vertical, adică:

- viteza de ridicare a roții pe firul exterior ( $v_r$ );
- accelerația de ridicare a roții pe firul exterior ( $a_r$ ).

$$v_r = \frac{dh_l}{dt} = \frac{dh_l}{dl} \cdot \frac{dl}{dt} = v \frac{dh_l}{dl} = \frac{V}{3,6} \cdot \frac{dh_l}{dt} \quad [ \text{mm/s} ] \quad ( 2.127 )$$

$$a_r = \frac{dv_r}{dt} = \frac{V}{3,6} \cdot \frac{dv_r}{dl} = \left( \frac{V}{3,6} \right)^2 \cdot \frac{d^2h_l}{dl^2} \quad [ \text{mm/s}^2 ] \quad ( 2.128 )$$

În relațiile 2.127 și 2.128 viteza de deplasare a vehiculului ( $v$  respectiv  $V$ ) se consideră constantă. Se determină și caracteristica (derivata) de ordinul 3 a supraînălțării:

$$\Delta_h = \frac{da_r}{dt} = \frac{V}{3,6} \cdot \frac{da_r}{dl} = \left( \frac{V}{3,6} \right)^3 \cdot \frac{d^3h_l}{dl^3} \quad [ \text{mm/s}^3 ] \quad ( 2.129 )$$

care caracterizează smucirea în plan vertical.

Pentru rampele supraînălțării (între un aliniament și o curbă circulară) rezultă următoarele relații:

**a) rampa liniară** (vezi relația 2.119):

$$v_{r \max} = \frac{h V}{3,6 L} \quad [ \text{mm/s} ] \quad ( 2.130 )$$

$$a_{r \max} \cong \frac{h V^2}{3,6^2 L a} \quad [ \text{mm/s}^2 ] \quad ( 2.131 )$$

$$\Delta_{h \max} \cong \frac{h V^3}{3,6^3 L a^2} \quad [ \text{mm/s}^3 ] \quad ( 2.132 )$$

**b) rampa parabolică** (vezi relația 2.120) pe prima jumătate a racordării:

$$v_{r \max} = \frac{4h V l_1}{3,6 L^2} \quad [ \text{mm/s} ] \quad ( 2.133 )$$

$$a_{r \max} = \frac{4h V^2}{3,6^2 L^2} \quad [ \text{mm/s}^2 ] \quad ( 2.134 )$$

$$\Delta_{h_{\max}} \cong \frac{8hV^3}{3,6^3L^3a} \quad [ \text{mm/s}^3 ] \text{ (la mijlocul racordării)} \quad (2.135)$$

**c) rampa sinusoidală** (vezi relația 2.123):

$$v_{r_{\max}} = \frac{hV}{3,6L} \left( 1 - \cos \frac{2\pi l}{L} \right) \quad [ \text{mm/s} ] \quad (2.136)$$

$$a_{r_{\max}} = \frac{2\pi hV^2}{3,6^2L^2} \sin \frac{2\pi l}{L} \quad [ \text{mm/s}^2 ] \quad (2.137)$$

$$\Delta_{h_{\max}} = \frac{4\pi^2 hV^3}{3,6^3L^3} \cos \frac{2\pi l}{L} \quad [ \text{mm/s}^3 ] \quad (2.138)$$

**d) rampa cosinusoidală** (vezi relația 2.125):

$$v_{r_{\max}} = \frac{\pi hV}{2 \cdot 3,6L} \sin \frac{\pi l}{L} \quad [ \text{mm/s} ] \quad (2.139)$$

$$a_{r_{\max}} = \frac{\pi^2 hV^2}{2 \cdot 3,6^2L^2} \cos \frac{\pi l}{L} \quad [ \text{mm/s}^2 ] \quad (2.140)$$

$$\Delta_{h_{\max}} = - \frac{\pi^3 hV^3}{2 \cdot 3,6^3L^3} \sin \frac{\pi l}{L} \quad [ \text{mm/s}^3 ] \quad (2.141)$$

În relațiile 2.127 ... 2.141 notațiile folosite au următoarea semnificație:

- $h$  este supraînălțarea curbei circulare [ mm ];
- $L$  – lungimea rampei supraînălțării [ m ];
- $V$  – viteza constantă a vehiculului [ km/h ];
- $a$  – ampatamentul vehiculului [ m ];
- $l$  – distanța de la începutul rampei până la punctul analizat [ m ].

Pentru compararea celor patru tipuri de rampe ale supraînălțării, în tabelul 2.3 sunt prezentate atât funcțiile maxime pentru  $v_r$ ,  $a_r$  și  $\Delta_h$  cât și valori numerice (în paranteză) pentru :  $V=160 \text{ km/h}$ ,  $L=224 \text{ m}$ ,  $h=140 \text{ mm}$  și  $a=17 \text{ m}$ .

Variația caracteristicilor  $v_r$ ,  $a_r$  și  $\Delta_h$  sunt prezentate în fig. 2.31.

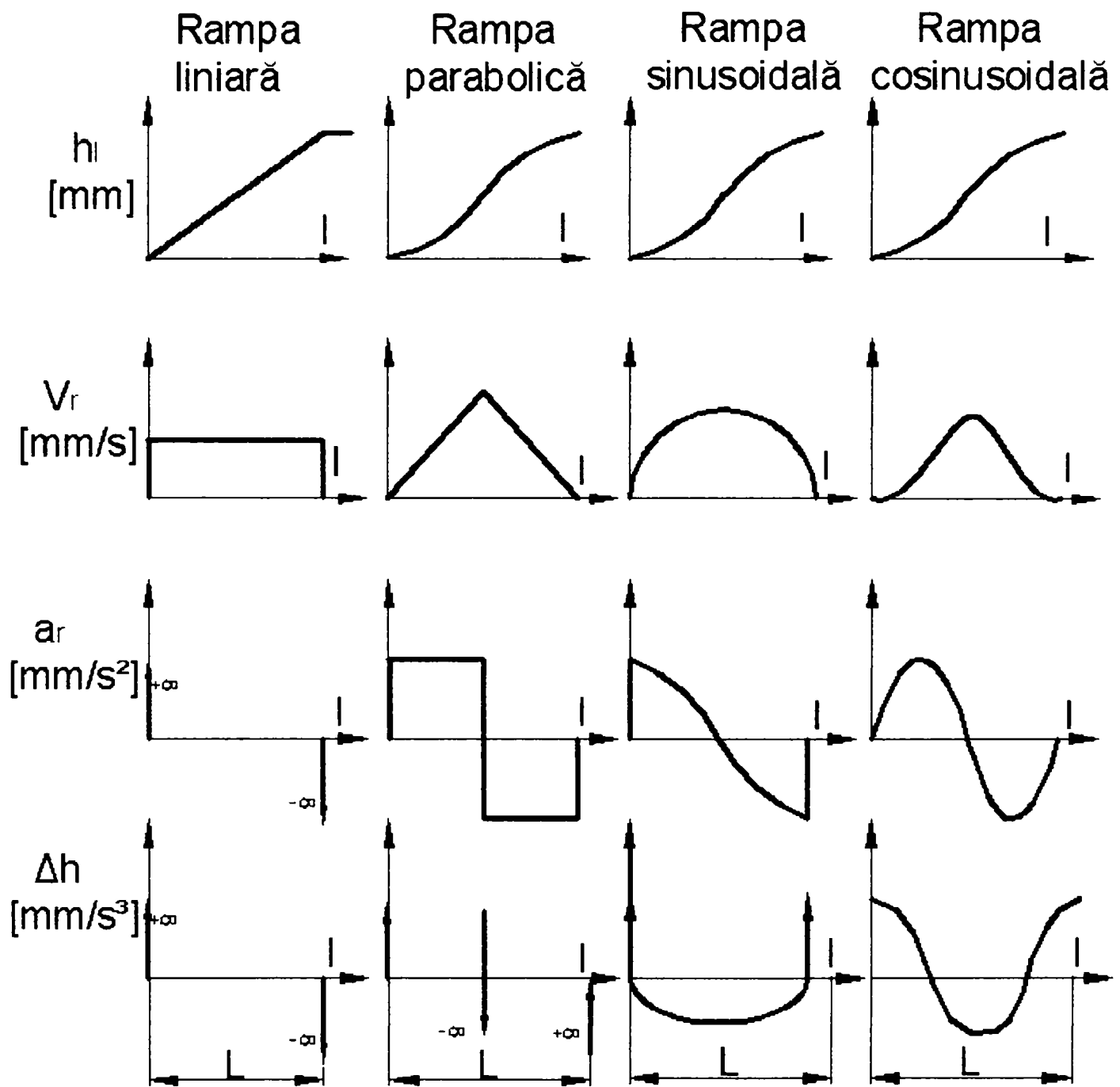
Din tabelul 2.3 și fig. 2.31 rezultă că rampele supraînălțării după funcții trigonometrice sunt cele mai favorabile în special pentru linii c.f. cu viteze sporite sau mari. Dacă se ia în considerare și înclinarea maximă a rampei ( $n=ctg\alpha$ ) și lungimea racordării ( $L$ ), rampa cosinusoidală este mai avantajoasă față de rampa sinusoidală, drept pentru care propun ca la realizarea liniilor de cale ferată pentru viteze sporite, administrația feroviară română să folosească rampe cosinusoidale la amenajarea curbelor.

Cea mai dezavantajoasă soluție este utilizarea rampei liniare deoarece în punctele  $AR$  și  $RC$  accelerația de ridicare ( $a_r$ ) și caracteristica de ordinul 3 ( $\Delta_h$ ) teoretic au valori infinite iar practic(din cauza elasticității suprastructurii) aceste valori sunt deosebit de mari.

**Tabelul 2.3.**

Rampa supraînălțării	Caracteristicile mișcării vehiculului		
	$v_{rmax}$ [ mm/s ]	$a_{rmax}$ [ mm/s <sup>2</sup> ]	$\Delta_{hmax}$ [ mm/s <sup>3</sup> ]
liniară	$\frac{hV}{3,6L}$ (27,78)	$\frac{hV^2}{3,6^2La}$ (72,62)	$\frac{hV^3}{3,6^3La^2}$ (189,86)
parabolică	$\frac{2hV}{3,6L}$ (55,56)	$\frac{8hV^2}{3,6^2L^2a}$ (44,09)	$\frac{8hV^3}{3,6^3L^2a}$ (115,27)
sinusoidală	$\frac{2hV}{3,6L}$ (55,56)	$\frac{2\pi hV^2}{3,6^2L^2a}$ (34,63)	$\frac{4\pi^2 hV^3}{3,6^3L^3a}$ (43,17)
cosinusoidală	$\frac{\pi hV}{7,2L}$ (43,63)	$\frac{\pi^2 hV^2}{2 \cdot 3,6^2 L^2 a}$ (27,20)	$-\frac{\pi^3 hV^3}{2 \cdot 3,6^3 L^3 a}$ ; $\frac{\pi^2 hV^3}{2 \cdot 3,6^3 L^2 a}$ (-16,95) ; (71,11)





*Fig. 2.31. Compararea caracteristicilor mișcării în plan vertical pe rampa supraînălțării.*

## 5. Lungimea curbelor de racordare

Lungimea curbelor de racordare se determină pe criterii mecanice, constructive etc, astfel încât să se asigure trecerea vehiculelor din aliniament în curba arc de cerc în mod treptat, liniștit și fără șocuri, în condiții de confort optime. Siguranța și confortul circulației sunt direct proporționale cu lungimea racordării.

Condițiile mecanice, tratate în continuare, impun o serie de condiții privind confortul circulației asupra variației forțelor (deci accelerațiilor) ce apar în mișcarea curbilinie și asupra vitezei de ridicare a roții pe firul exterior sau a vehiculului pe rampa supraînălțării.

În cele ce urmează, se apreciază că accelerația tangențială nu este interesantă, deoarece în ipoteza unei viteze constante, ea devine nulă ( $a_t = dv/dt = 0$ ).

### 5.1. Variația accelerației normale

Accelerația normală variază odată cu timpul pe toată durata parcurgerii curbei de racordare. Din condiția de confort se impune ca variația accelerației normale (notată în continuare cu  $I$  [ $m/s^3$ ]) să nu depășească valori limită stabilite experimental. În ipoteza vitezei constante, accelerația normală ( $a_n$ ) este proporțională cu curbura ( $C$ ), iar spațiul parcurs ( $l$ ) este proporțional cu timpul, ceea ce înseamnă că creșterea accelerației în timp ( $da_n/dt = I$ ) reprezintă chiar derivata curburii în raport cu timpul sau în raport cu spațiul:

$$I = \frac{da_n}{dt} = v^2 \frac{dC}{dt} = v^2 \frac{dC}{dl} \cdot \frac{dl}{dt} = v^3 \frac{dC}{dl} \quad [m/s^3] \quad (2.142)$$

În cazul variației liniare a curburii (relația 2.34 și fig. 2.13):

$$\frac{dC}{dl} = \frac{1}{RL} \quad [m^{-2}] \quad \text{și} \quad (2.143)$$

$$I = v^3 \frac{1}{RL} = \frac{V^3}{3,6^3 RL} \Rightarrow \quad (2.144)$$

$$\Rightarrow L_{\min} = \frac{V^3}{3,6^3 \cdot R \cdot I_{\max}} \quad [m] \quad (2.145)$$

Valori limită stabilite experimental pentru  $I$  sunt:

- $I = 0,3 \dots 0,5 m/s^3$  la linii ferate cu confort sporit;
- $I = 0,5 \dots 1,0 m/s^3$  la linii ferate cu confort mai slab.

Exemplificare:

$$- \text{ pentru } I = 0,3 m/s^3 \quad \Rightarrow \quad L_{\min} \cong \frac{V^3}{14R} \quad [m];$$

$$- \text{ pentru } I = 0,5 m/s^3 \quad \Rightarrow \quad L_{\min} \cong \frac{V^3}{24R} \quad [m].$$

În cazul variației parabolice a curburii (relația 2.35 și fig. 2.14.):

$$\frac{dC}{dl} = \frac{2}{RL^2} \left( \frac{dl^2}{dl} \right) = \frac{4l}{RL^2} \quad [m^{-2}] \quad (2.146)$$

$$I_{\max} = \left[ \frac{V^3}{3,6^3} \cdot \frac{4l}{RL^2} \right]_{l=\frac{L}{2}} = \frac{2V^3}{3,6^3 \cdot RL} \quad [m/s^3] \quad (2.147)$$

$$L_{\min} = \frac{2V^3}{3,6^3 \cdot R \cdot I_{\max}} \quad [m] \quad (2.148)$$

Exemplificare:

$$- \text{ pentru } I_{max} = 0,3 \text{ m/s}^3 \quad \Rightarrow \quad L_{min} \cong \frac{V^3}{7R} \quad [ \text{ m } ] ;$$

$$- \text{ pentru } I_{max} = 0,5 \text{ m/s}^3 \quad \Rightarrow \quad L_{min} \cong \frac{V^3}{12R} \quad [ \text{ m } ] .$$

În cazul variației sinusoidale a curburii (relația 2.40 și fig. 2.15.):

$$\frac{dC}{dl} = \frac{d}{dl} \left( \frac{1}{RL} - \frac{1}{2\pi R} \sin \frac{2\pi l}{L} \right) = \frac{1}{RL} - \frac{2\pi}{2\pi RL} \cos \frac{2\pi l}{L}$$

$$\frac{dC}{dl} = \frac{1}{RL} \left( 1 - \cos \frac{2\pi l}{L} \right) \quad [ \text{ m}^{-2} ] \quad (2.149)$$

$$I_{max} = \left[ \frac{V^3}{3,6^3} \cdot \frac{1}{RL} \left( 1 - \cos \frac{2\pi l}{L} \right) \right]_l = \frac{2V^3}{3,6^3 \cdot RL} \quad [ \text{ m/s}^3 ] \quad (2.150)$$

$$L_{min} = \frac{2V^3}{3,6^3 \cdot R \cdot I_{max}} \quad [ \text{ m } ] \quad (2.151)$$

Se observă că relația 2.151 este identică cu 2.148.

În cazul racordărilor cosinusoidale (relația 2.43 și fig. 2.16.):

$$\frac{dC}{dl} = \frac{d}{dl} \left[ \frac{1}{2R} \left( 1 - \cos \frac{\pi l}{L} \right) \right] = \frac{1}{2R} \cdot \frac{\pi}{L} \sin \frac{\pi l}{L}$$

$$\frac{dC}{dl} = \frac{\pi}{2RL} \sin \frac{\pi l}{L} \quad [ \text{ m}^{-2} ] \quad (2.152)$$

$$I_{max} = \left( \frac{V^3}{3,6^3} \cdot \frac{\pi}{2RL} \sin \frac{\pi l}{L} \right)_{l=L/2} = \frac{\pi V^3}{2 \cdot 3,6^3 \cdot RL} \quad [ \text{ m/s}^3 ] \quad (2.153)$$

$$L_{min} = \frac{\pi V^3}{2 \cdot 3,6^3 \cdot R \cdot I_{max}} \quad [ \text{ m } ] \quad (2.154)$$

Exemplificare:

$$- \text{ pentru } I_{max} = 0,3 \text{ m/s}^3 \quad \Rightarrow \quad L_{min} \cong \frac{V^3}{9R} \quad [ \text{ m } ] ;$$

$$- \text{ pentru } I_{max} = 0,5 \text{ m/s}^3 \quad \Rightarrow \quad L_{min} \cong \frac{V^3}{15R} \quad [ \text{ m } ].$$

## 5.2. Accelerația unghiulară

Accelerația unghiulară ( $a_\omega$ ) este de asemenea limitată la valori cuprinse între 0,02 ... 0,05 rad/s<sup>2</sup>, valori stabilite experimental din condiții de confort. Viteza unghiulară ( $\omega$ ) reprezintă unghiul (în radiani sau grade) cu care mobilul se rotește în jurul axei verticale în unitatea de timp. Viteza unghiulară crește pe lungimea racordării până la intrarea în arcul de cerc, pe parcursul căruia rămâne constantă. Viteza de deplasare a vehiculului ( $v$ ) se consideră constantă.

$$a_\omega = \frac{d\omega}{dt} = 0,02 \dots 0,05 \text{ rad/s}^2 = 1^\circ 10' \dots 2^\circ 50' / \text{s}^2 \quad (2.155)$$

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dl} = v \cdot \frac{1}{\rho} = vC \quad [ \text{ rad/s } ] \quad (2.156)$$

$$a_\omega = v \cdot \frac{dC}{dt} = v^2 \frac{dC}{dl} \quad [ \text{ rad/s}^2 ] \quad (2.157)$$

În cazul variației liniare a curburii (2.34):

$$a_\omega = \frac{v^2}{RL} = \frac{V^2}{3,6^2 RL} \cong \frac{V^2}{13RL} = \text{const.} \quad [ \text{ rad/s}^2 ] \quad (2.158)$$

$$L_{min} \cong \frac{V^2}{13R a_{\omega max}} \quad [ \text{ m } ] \quad (2.159)$$

Exemplificare:

$$- \text{ pentru } a_{max} = 0,02 \text{ rad/s}^2 \quad \Rightarrow \quad L_{min} \cong \frac{4V^2}{R} \quad [ \text{ m } ];$$

$$- \text{ pentru } a_{\max} = 0,05 \text{ rad/s}^2 \Rightarrow L_{\min} \cong \frac{1,5 V^2}{R} \quad [ \text{ m } ].$$

În cazul variației parabolice a curburii (2.35 și 2.36):

$$a_{\omega} = v^2 \frac{4l}{RL^2} \quad [ \text{ rad/s}^2 ], \quad \text{pentru } l = 0 \dots L/2 \quad ( 2.160 )$$

$$a_{\omega} = v^2 \frac{4(L-l)}{RL^2} \quad [ \text{ rad/s}^2 ], \quad \text{pentru } l = L/2 \dots L \quad ( 2.161 )$$

Accelerația unghiulară are valoare maximă în punctul  $l = L/2$ :

$$a_{\omega \max} = \frac{2v^2}{RL^2} = \frac{2V^2}{3,6^2 RL^2} \quad [ \text{ rad/s}^2 ] \quad ( 2.162 )$$

$$L_{\min} = \frac{2V^2}{3,6^2 R a_{\omega \max}} \quad [ \text{ m } ] \quad ( 2.163 )$$

Exemplificare:

$$- \text{ pentru } a_{\omega \max} = 0,02 \text{ rad/s}^2 \Rightarrow L_{\min} \cong \frac{8V^2}{R} \quad [ \text{ m } ];$$

$$- \text{ pentru } a_{\omega \max} = 0,05 \text{ rad/s}^2 \Rightarrow L_{\min} \cong \frac{3V^2}{R} \quad [ \text{ m } ].$$

În cazul racordării sinusoidale (2.37):

$$a_{\omega} = v^2 \cdot \frac{1}{RL} \cdot \left( 1 - \cos \frac{2\pi l}{L} \right) \quad [ \text{ rad/s}^2 ] \quad ( 2.164 )$$

Valoarea maximă a accelerației unghiulare se obține în punctul  $l = L/2$ ,

unde  $\cos(2\pi l/L) = \cos\pi = -1$ :

$$a_{\omega \max} = \frac{2v^2}{RL^2} = \frac{2V^2}{3,6^2 RL^2} \quad [ \text{ rad/s}^2 ] \quad ( 2.165 )$$

Se observă că relația 2.165 este identică cu 2.162.

În cazul racordării cosinusoidale (2.41):

$$a_{\omega} = v^2 \cdot \frac{\pi}{2RL} \sin \frac{\pi l}{L} \quad [ \text{rad/s}^2 ] \quad (2.166)$$

$$a_{\omega_{\max}} = (a_{\omega})_{l=L} = \frac{\pi v^2}{2RL} = \frac{\pi V^2}{2 \cdot 3,6^2 RL} \quad [ \text{rad/s}^2 ] \quad (2.167)$$

$$L_{\min} = \frac{\pi V^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot R \cdot a_{\omega_{\max}}} \quad [ \text{m} ] \quad (2.168)$$

Exemplificare:

$$- \text{ pentru } a_{\omega} = 0,02 \text{ rad/s}^2 \quad \Rightarrow \quad L_{\min} \cong \frac{6 V^2}{R} \quad [ \text{m} ];$$

$$- \text{ pentru } a_{\omega_{\max}} = 0,05 \text{ rad/s}^2 \quad \Rightarrow \quad L_{\min} \cong \frac{2,4 V^2}{R} \quad [ \text{m} ].$$

### 5.3. Viteza de ridicare a roții pe firul exterior

Viteza de ridicare ( $v_r$ ) a roții pe firul exterior supraînălțat apare tot ca o condiție de confort. Dacă lungimea racordării este prea mică (deci și a rampei supraînălțării), urcarea roții pe firul exterior va fi însoțită de un șoc. Pentru diminuarea șocului viteza de ridicare a roții este limitată la valori stabilite experimental pentru anumite condiții de confort impuse:

$$v_r = 0,027 \dots 0,070 \quad [ \text{m/s} ] \quad (2.169)$$

$$v_r = \frac{dh}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{dh}{dl} = v \cdot \frac{dh}{dl} \quad [ \text{m/s} ] \quad (2.170)$$

În cazul rampei liniare a supraînălțării (relația 2.119 și fig. 2.27), considerând supraînălțarea  $h$  în [ m ], se obține:

$$v_r = v \cdot \frac{d}{dl} \left( h \frac{l}{L} \right) = v \cdot \frac{h}{L} = \frac{Vh}{3,6L} \quad [ \text{m/s} ] \quad (2.171)$$

$$L_{\min} = \frac{hV}{3,6L v_{r\max}} \quad [m] \quad (2.172)$$

Exemplificare:

– pentru  $v_r = 0,027 \text{ m/s} \Rightarrow L_{\min} \cong 10 hV \quad [m]$ ;

– pentru  $v_r = 0,070 \text{ m/s} \Rightarrow L_{\min} \cong 4 hV \quad [m]$ .

Pentru rampa parabolică (relațiile 2.120; 2.121 și fig. 2.28) se determină

$v_{r\max}$ :

$$v_{r\max} = (v_r)_{l=L/2} = \left[ v \cdot \frac{d}{dl} \left( \frac{2hl^2}{L^2} \right) \right]_{l=L/2}$$

$$v_{r\max} = \frac{2hv}{L} = \frac{2hV}{3,6L} \quad [m/s] \quad (2.173)$$

$$L_{\min} = \frac{hV}{1,8L v_{r\max}} \quad [m] \quad (2.174)$$

Exemplificare:

– pentru  $v_{r\max} = 0,027 \text{ m/s} \Rightarrow L_{\min} \cong 20 hV \quad [m]$ ;

– pentru  $v_{r\max} = 0,070 \text{ m/s} \Rightarrow L_{\min} \cong 8 hV \quad [m]$ .

Pentru rampa sinusoidală (relația 2.123 și fig. 2.29) se obține:

$$v_{r\max} = (v_r)_{l=L/2} = \left[ v \cdot \frac{d}{dl} \left( \frac{hl}{L} - \frac{h}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{L} \right) \right]_{l=L/2} \quad [m/s]$$

$$v_{r\max} = \left[ \frac{hv}{L} \left( 1 - \cos \frac{2\pi l}{L} \right) \right]_{l=L/2} = \frac{2hV}{3,6L} \quad [m/s] \quad (2.175)$$

$$L_{\min} = \frac{hV}{1,8L v_{r\max}} \quad [m] \quad (2.176)$$

Ultima relație este identică cu relația 2.174.

În cazul rampei cosinusoidale (relația 2.125 și fig. 2.30), viteza de ridicare a roții  $v_r$  se poate determina astfel:



$$v_r = v \cdot \frac{d}{dl} \left[ \left( 1 - \cos \frac{\pi l}{L} \right) \frac{h}{2} \right] = v \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{\pi}{L} \sin \frac{\pi l}{L} \quad [ \text{m/s} ] \quad ( 2.177 )$$

$$v_{r \max} = (v_r)_{l=L/2} = \frac{\pi h v}{2L} = \frac{\pi h V}{7,2L} \quad [ \text{m/s} ] \quad ( 2.178 )$$

$$L_{\min} = \frac{\pi h V}{7,2 v_{r \max}} \quad [ \text{m} ] \quad ( 2.179 )$$

Exemplificare:

- pentru  $v_{r \max} = 0,027 \text{ m/s} \Rightarrow L_{\min} \cong 16 \text{ hV} \quad [ \text{m} ]$ ;
- pentru  $v_{r \max} = 0,070 \text{ m/s} \Rightarrow L_{\min} \cong 6 \text{ hV} \quad [ \text{m} ]$ .

#### 5.4. Condiții constructive pentru determinarea lungimii minime a racordării

Din punct de vedere constructiv, deplasarea  $m$  a curbei circulare (fig. 2.11) trebuie să aibă valori numerice aplicabile pe teren. În mod practic, valoarea  $m$  s-a limitat la  $2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$  ceea ce conduce la următoarele relații:

- pentru parabola cubică (clotoidă), având  $m = L^2 / 24R$ :

$$L_{\min} = \sqrt{0,02 \cdot 24R} \cong 0,7\sqrt{R} \quad [ \text{m} ] \quad ( 2.180 )$$

- pentru parabola de gradul 4, având  $m = L^2 / 48R$ :

$$L_{\min} = \sqrt{0,02 \cdot 48R} \cong \sqrt{R} \quad [ \text{m} ] \quad ( 2.181 )$$

- pentru racordarea sinusoidală, având  $m = L^2 / 61,21R$ :

$$L_{\min} = \sqrt{0,02 \cdot 61,21R} \cong 1,106\sqrt{R} \quad [ \text{m} ] \quad ( 2.182 )$$

- pentru racordarea cosinusoidală, având  $m = L^2 / 42,23R$ :

$$L_{\min} = \sqrt{0,02 \cdot 42,23R} \cong 0,92\sqrt{R} \quad [ \text{m} ] \quad ( 2.183 )$$

### 5.4.1. Concluzii

La determinarea lungimii minime a racordărilor din condiții mecanice, viteza vehiculelor  $v$  se consideră constantă.

Pentru racordările având curbura respectiv rampa supraînălțării în  $S$  (parabolă, funcție sinusoidală sau funcție cosinusoidală),  $I$ ,  $a_{\omega}$  și  $v_r$  ating valoarea maximă într-un singur punct aflat la mijlocul racordării. Rezultă că pentru cele trei condiții mecanice studiate valorile numerice indicate pot fi acceptate la limita maximă, păstrându-se totodată și condițiile de confort impuse.

Exceptând parabola de gradul 3, la condiții de confort impuse identice, cea mai mică lungime minimă se obține pentru cosinusoidă. La aceeași concluzie se ajunge comparând lungimile minime determinate din condiții constructive (4.4).

### 5.5. Sporirea vitezei maxime pe liniile existente

La calea ferată se pune frecvent problema sporirii vitezei maxime de circulație pe liniile existente. Trebuie deci adoptate noi elemente geometrice liniei (în curbe în mod special) ținând seama de următoarele condiții obligatorii:

- păstrarea razei de curbură  $R$  pe sectorul arcului de cerc;
- păstrarea poziției arcului de cerc central ( $m$  nemodificat);
- păstrarea unghiului aliniamentelor, deci păstrarea suprafeței diagramei curburilor pe toată lungimea curbei (adică pe lungimea celor două racordări și a arcului de cerc central).

Prima condiție se realizează ușor impunând în calcule, la sfârșitul curbei de racordare, o curbură egală cu  $1/R$ .

Condiția a doua este necesară când situația de pe teren nu permite deplasarea laterală a curbelor și se realizează prin modificarea lungimii  $L$  a curbei de racordare. Astfel, pentru trecerea de la parabola de gradul 3 (având lungimea notată cu  $L_3$ ) la parabola de gradul 4 (având lungimea notată cu  $L_4$ ), se obține:

$$m_3 = \frac{L_3^2}{24R} = m_4 = \frac{L_4^2}{48R} \quad \Rightarrow \quad L_4^2 = 2L_3^2 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L_4 \cong 1,41 L_3 \quad [m] \quad (2.184)$$

Pentru trecerea de la parabola de gradul 3 la sinusoidă, se obține:

$$m_3 = \frac{L_3^2}{24R} = m_{\sin} = \frac{L_{\sin}^2}{61,21R} \quad \Rightarrow \quad L_{\sin}^2 = \frac{61,21}{24} L_3^2 \quad \Rightarrow$$

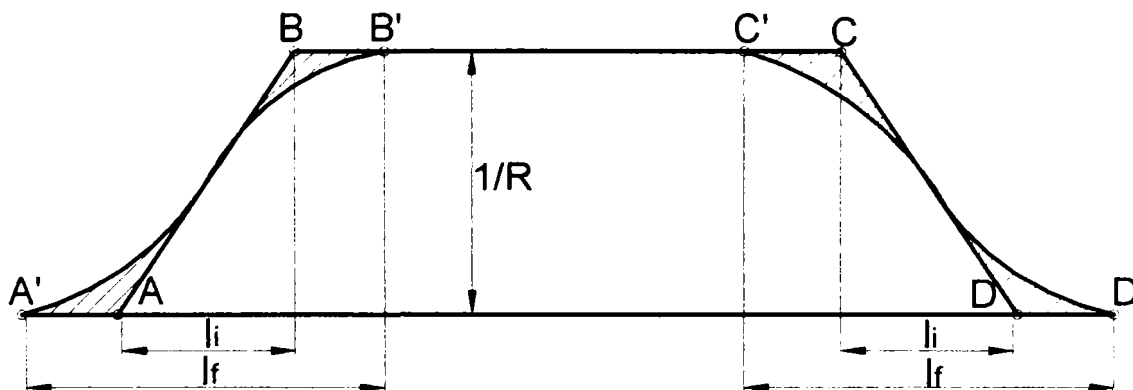
$$\Rightarrow L_{\sin} \cong 1,6 L_3 \quad [m] \quad (2.185)$$

Pentru trecerea de la parabola de gradul 3 la cosinusoidă, se obține:

$$m_3 = \frac{L_3^2}{24R} = m_{\cos} = \frac{L_{\cos}^2}{42,23R} \quad \Rightarrow \quad L_{\cos}^2 = \frac{42,23}{24} L_3^2 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L_{\cos} \cong 1,33 L_3 \quad [m] \quad (2.186)$$

Pentru alte modificări, rezultă alte rapoarte între lungimile curbelor de tranziție – existentă și modificată. Dacă se păstrează lungimea racordării nemodificată, apar modificări în valoarea lui  $m$  și curba nouă părăsește traseul existent.



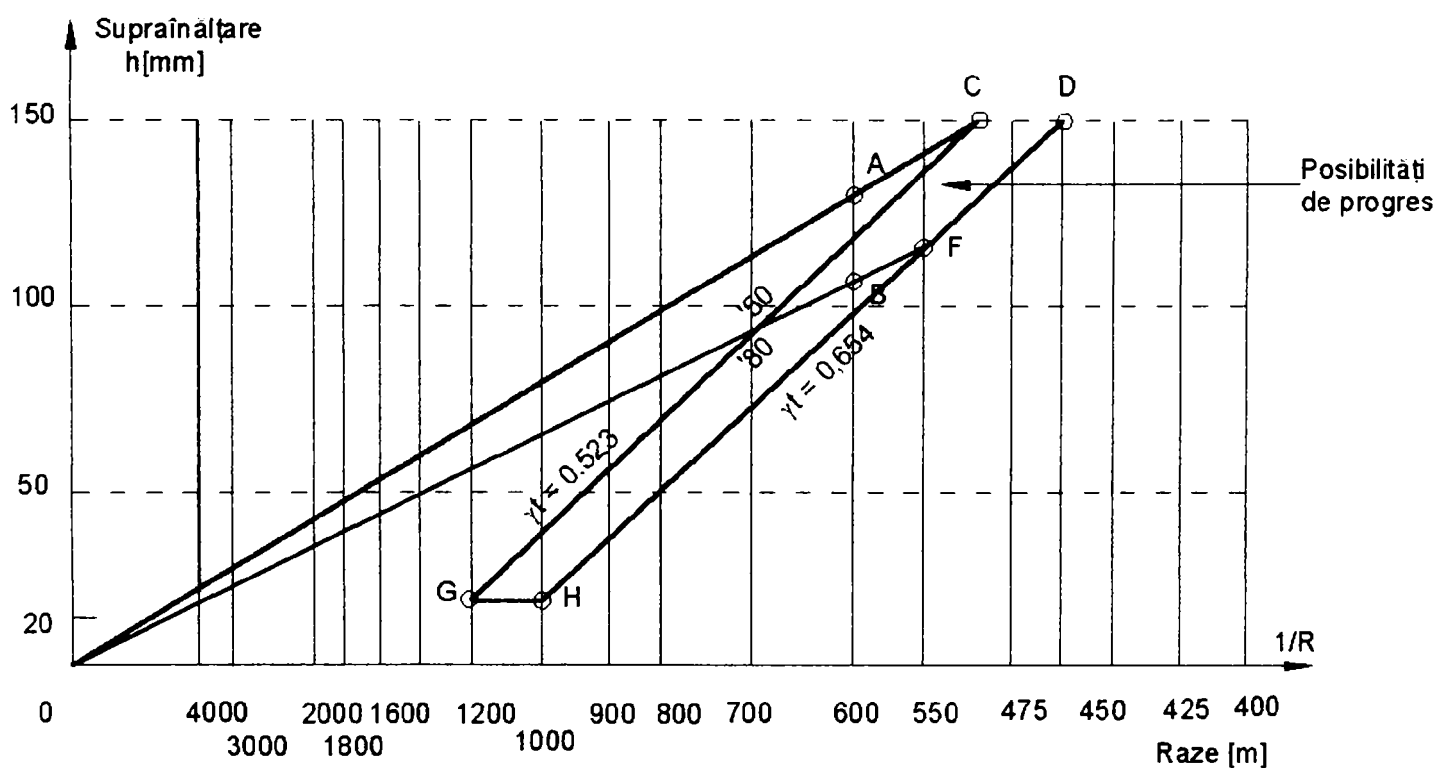
*Fig. 2.32. Egalitatea suprafețelor diagramelor curburilor.*

Condiția a treia, cea a păstrării unghiului aliniamentelor, se realizează dacă nu se modifică suprafața diagramei curburilor (fig. 2.32).

Suprafețele  $ABCD$  și  $A'B'C'D'$  sunt egale, deci nu se modifică mărimea unghiului central inițial, obținută prin integrarea diagramei curburilor.

## 6. Posibilitățile de aplicare ale noilor teorii privind geometria căii

Sporirea limitelor instrucționale din anii '50 și păstrarea construcțiilor logice din acea perioadă împreună cu noile teorii privind geometria căii creează posibilitatea de asigurare a condițiilor de confort și de siguranță în circulația trenurilor cu viteze obișnuite și mari.



**Fig. 2.33.** Compararea limitelor din anii '80 cu cele din anii '50

În continuare se vor analiza două tipuri de racordări: clotoida și cosinusoida, cea din urmă fiind propunere pentru îmbunătățirea condițiilor de confort și siguranță pe liniile CFR în condițiile în care se dorește sporirea vitezei maxime de circulație fără modificarea traseului.

La început se prezintă funcțiile liniare pentru supraînălțarea normală, respectiv cea redusă în funcție de variația liniară a curburii, a căror teorie a fost prezentată în cap. 2.1, pentru  $V_{\max}=100$  km/h.

S-a arătat că diagramele curburii și a accelerației transversale sunt și ele liniare și sunt proporționale cu diagramele supraînălțării pe lungimea racordării. Triunghiul OAB cuprinde valorile admise în anii '50. Se observă că sporind limitele maxime admise, cu această teorie puteau fi sporite vitezele maxime de circulație. Astfel, conform fig. 2.33, prelungirea dreptei OA (care reprezintă diagrama supraînălțărilor instrucționale) până la punctul C (care corespunde valorii  $h_{ef} = h_{\max} = 150$  mm), viteza maximă de 100 km/h ar fi posibilă și în curba cu  $R = 500$  m față de cea cu  $R=600$  m. În punctul C accelerația transversală nu ajunge la limita de  $0,65$  m/s<sup>2</sup>, astfel încât raza poate fi micșorată în continuare până la 472 m, corespunzător punctului D. Dreapta OB poate fi prelungită până la punctul F, unde accelerația transversală admisă ( $0,65$  m/s<sup>2</sup>) apare în dreptul  $R = 565$  m.

Trebuie ca în noile instrucții valorile limită să se transforme în mărimi obligate, ceea ce va duce la reducerea drastică a supraînălțării. În fig. 2.33 se poate observa paralelogramul CGHD care reprezintă posibilitățile de îmbunătățire a geometriei căii.

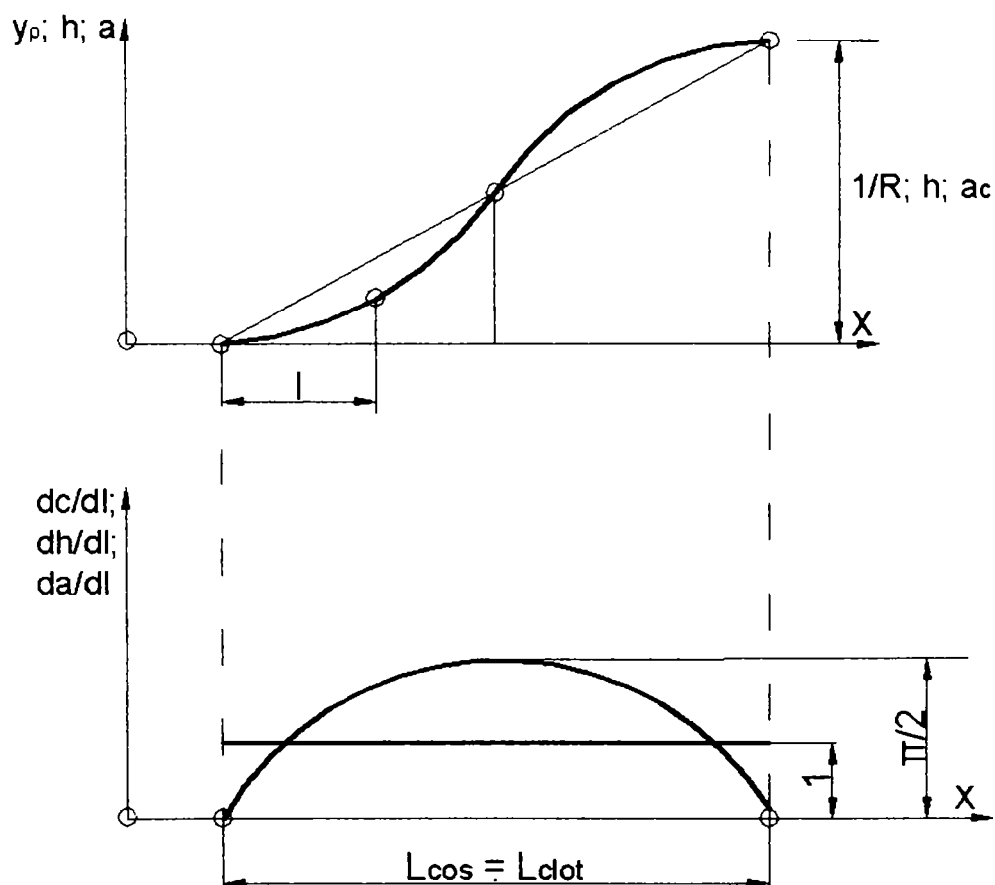
Rămâne de rezolvat următoarea problemă: cum poate fi justificată impunerea valorii maxime a accelerației transversale, valoare care a fost socotită ca excepțională ?

Variația cosinusoidală a curburii și a supraînălțării pe lungimea racordării trebuie impuse pe liniile unde  $V_{\max} \geq 120$  km/h:

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_{\cos} = C_{\cos} = \frac{1}{2R} \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot l}{L}\right) \quad (2.187)$$

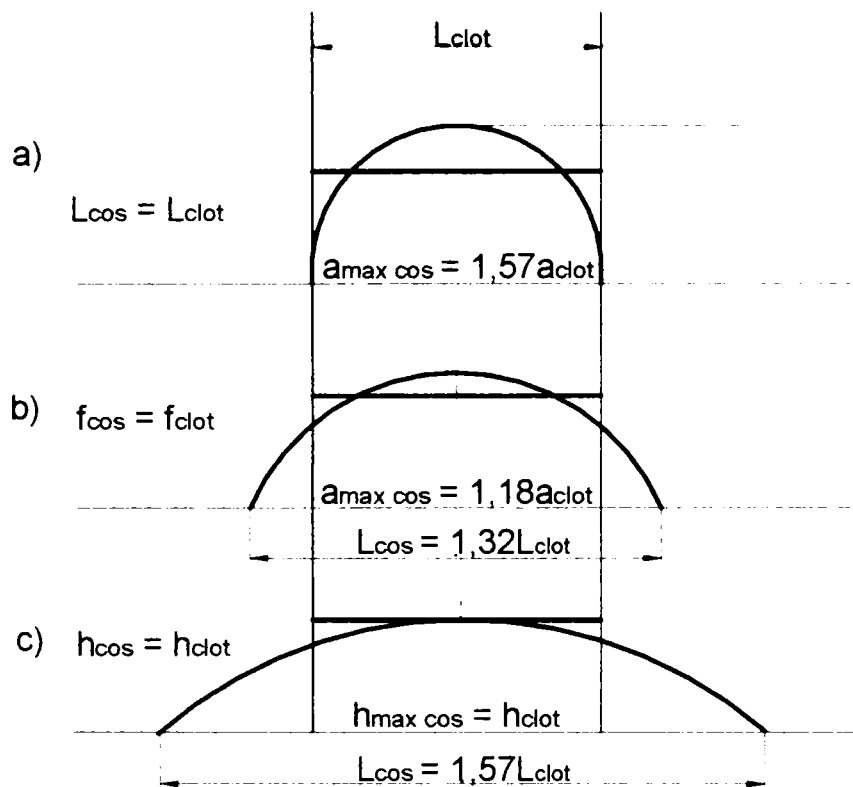
$$(h)_{\cos} = \frac{h}{2} (1 - \cos \pi \cdot l) \quad (2.188)$$

unde  $h$  reprezintă supraînălțarea constantă în curba circulară.



**Fig. 2.34.** *Diagramele curburii (a) și ale variației curburii (b)*

În fig. 2.34 sunt prezentate diagramele de variație ale curburii ( $C$ ), ale accelerației transversale ( $a_c$ ) precum și a altor parametri proporționali cu acestea, pentru racordări (una cosinusoidală și cealaltă clotoidă) având aceeași lungime.



**Fig. 2.35.** Compararea lungimii racordărilor

În figura 2.35 sunt comparate cele două tipuri de racordări pentru aceeași deplasare  $m$  a arcului de cerc central. Această problemă poate fi importantă când se trece de la un tip de racordare la alt tip și trebuie păstrată poziția arcului de cerc central.

Se poate observa că diagramele corespunzătoare racordărilor cosinusoidale sunt mai „elegante”, dar pentru aceeași lungime a racordărilor, ordonata maximă (la mijlocul racordării) crește de  $\pi/2 = 1,57$  ori. Această creștere se resimte mai mult pe rampa supraînălțării, unde torsionarea exagerată a căii poate periclita siguranța circulației. Astfel avantajul racordărilor cosinusoidale poate fi compromis.

Acest dezavantaj se elimină dacă lungimea racordării cosinusoidale sporește corespunzător, impunându-se păstrarea poziției arcului de cerc central:

$$M_3 = m_{\cos} \rightarrow \frac{L_3^2}{24R} = \frac{L_{\cos}^2}{42.23R} \rightarrow L_{\cos} = 1,32 L_3 \quad (2.189)$$

În această situație ordonata maximă a diagramei cosinusoidale este cu 18,4 % mai mare decât cea corespunzătoare clotoidei, deci se poate constata îmbunătățirea condițiilor din situația precedentă, insuficientă însă pentru cosinusoidală.

Pentru eliminarea totală a dezavantajelor date de ordonatele sporite ale cosinusoidei, există trei soluții:

- reducerea supraînălțării în arcul de cerc central;
- sporirea lungimii racordării cosinusoidale;
- lărgirea limitelor (toleranțelor) cinematice în cazul utilizării cosinusoidei.

Reducerea valorii supraînălțării în curbe nu poate fi permisă de nici o administrație pentru a evita sporirea accelerației transversale necompensate la peste  $0,65 \text{ m/s}^2$ , indiferent de geometria racordării.

Racordările cosinusoidale vor avea lungimea sporită față de clotoide. Unele administrații feroviare (DB, ÖBB, MAV) dau în tabele lungimi ale cosinusoidelor sporite cu 20... 70 m față de clotoidele corespunzătoare acelorași valori  $R$  și  $V_{\max}$ .

Pentru variația accelerației transversale (determinată cu relația 2.25:  $I = \frac{V^3}{R \cdot L}$ ), valoarea maximă admisă este de  $0,3 \text{ m/s}^3$  în cazul clotoidei dar poate fi sporită la  $0,4 \text{ m/s}^3$  în cazul cosinusoidei, profitând de variația mai favorabilă a acesteia.

În tabelul 2.4 este prezentată compararea valorilor caracteristice cinematice după instrucțiile din anii '50, modificările din anii '80 și cosinusoidă pentru  $V_{\max} = 100 \text{ km/h}$  și  $R = 500 \text{ m}$  respectiv  $R = 1\ 000 \text{ m}$ .

Analizând datele din tabelul 2.4 se observă că în ce privește accelerația transversală necompensată, clotoida este mai avantajoasă, ceea ce este în defavoarea cosinusoidei. Aceasta a rezultat din cauză că în cazul sporirii vitezelor



Tabelul 2.4

V	R	RACORD	C/1000	L	h	T	h <sub>t</sub>	γ <sub>T</sub>	I <sub>t</sub>	I <sub>ef</sub>		π I <sub>ef</sub> · 2	h L	h 2L
										$\frac{v^2}{R} - \frac{m}{153}$	$\frac{v^3}{RL}$			
$\frac{km}{h}$	m		m <sup>2</sup>	m	mm	s	ms <sup>-2</sup>	ms <sup>-2</sup>	ms <sup>-3</sup>	ms <sup>-3</sup>	ms <sup>-3</sup>	%	%	max
100	500	CLOT	78,0	130	130	4,68	1,286	0,436	0,275	0,093	0,154	1		
			67,1	112	112	4,03		0,554	0,318	0,137				0,192
				150	116	5,4		0,528	0,238					
	1000	CLOT	78,0	78	78	2,8	0,772	0,262	0,214	0,094	0,259	1		
			67,1	67,1	67	2,4		0,333	0,319	0,139				0,317
				88	38	3,16		0,523	0,243					
		cos			20		0,641	(max)					0,4	0,3

de circulație, diminuarea supraînălțării și diminuarea accelerației transversale necompensate sunt deziderate antagoniste.

Dacă în loc de accelerație transversală necompensată  $\gamma_t = \left( \frac{v^2}{T} - \frac{h}{153} \right) \cdot \frac{v}{L}$

se compară valorile variației accelerației transversale ( $I = \frac{v^3}{R \cdot L}$ ), admițând importanța valorii supraînălțării, cosinusoida în mod eronat devine mai avantajoasă.

Analizând critic caracteristicile cinematice corespunzătoare diferitelor tipuri de racordări, rezultă că acestea în unele cazuri se contrazic, concluziile putând fi eronate. În acest context trebuie făcut un pas înainte și trebuie analizate cauzele și efectele mișcării, adică trebuie trecut din lumea cinematicii în lumea cineticii.

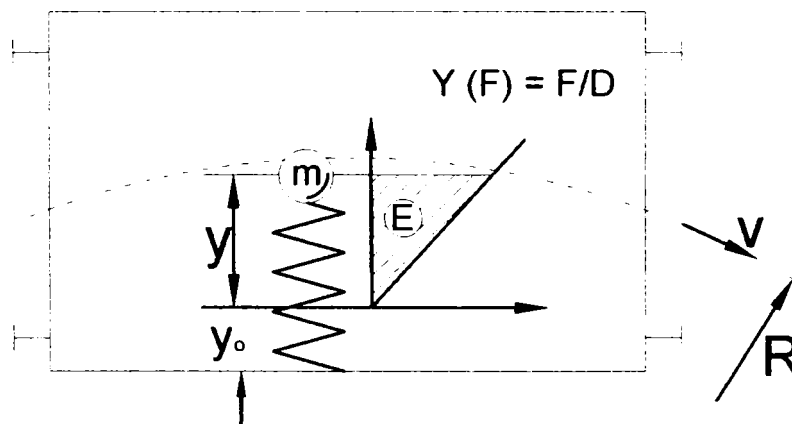
## CAP. III. RACORDĂRI CINETICE

Vehiculul care se deplasează cu viteză constantă în aliniament are energie cinetică dată de mișcarea de translație. Dacă același vehicul se deplasează pe un arc de cerc, energia cinetică a acestuia va spori cu cea dată de rotirea vehiculului în jurul axei sale verticale. Mai mult, deplasarea pe o curbă arc de cerc duce la modificarea poziției cutiei vagonului față de partea rulantă (roți, boghiuri) prin comprimarea inegală a arcurilor, suspensiilor, apărând astfel și energie potențială pe lângă energia cinetică. Sporul de energie în curba arc de cerc se cumulează înainte ca vehiculul să pătrundă în curbă, adică pe lungimea racordărilor va avea loc un lucru mecanic care poate fi caracterizat prin puterea mecanică.

Puterea mecanică depinde de variația curburii.

### 1. Definierea puterii mecanice în curba de racordare

Se alege modelul prezentat în figura 3.1. Se presupune că deplasarea masei  $m$  este proporțională cu forța (arcul are caracteristica liniară  $D$  în  $[N/m]$ ) iar mișcarea este fără oscilații.



**Fig. 3.1.** Model pentru calculul lucrului mecanic din interiorul materialului rulant care se deplasează pe o curbă de racordare

În curbă forța centrifugă ( $F_c$ ) produce deplasarea masei  $m$  cu  $y$ :

$$y = \frac{F_c}{D} = \frac{mv^2}{DR} \quad [\text{m}] \quad (3.1)$$

Forța  $F_c$  prin deplasarea  $y$  produce un lucru mecanic căruia îi corespunde energia potențială ( $E_p$ ) cumulată în arc:

$$E_p = \frac{yF_c}{2} = \frac{m^2 v^4}{2DR^2} \quad [\text{Nm}] \quad (3.2)$$

Viteza  $v$  fiind constantă, singura variabilă este curbura în raport cu deplasarea ( $s$ ):

$$E_p = \frac{m^2 v^4}{2D} \cdot (C(s))^2 \quad [\text{Nm}] \quad (3.3)$$

Curbura este variabilă doar pe lungimea racordării iar energia cumulată prin parcurgerea acesteia este:

$$\frac{dE_p}{ds} = \frac{m^2 v^4}{D} \cdot C \cdot \frac{dC}{ds} \quad (3.4)$$

Puterea mecanică este dată de derivata aceleiași energii în raport cu timpul:

$$P = \frac{dE_p}{dt} = \frac{dE_p}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{m^2 v^5}{D} \cdot C \cdot \frac{dC}{ds} \quad [\text{W}] \quad (3.5)$$

Din ultimele relații rezultă că racordarea nu poate fi apreciată corect doar prin curbura sau derivata acesteia. Se recomandă să se ia în considerare produsul acestora.

În ultima relație este ascunsă atât accelerația transversală ( $a_c$ ) cât și variația acesteia ( $I_t$ ):

$$P = \frac{m^2}{D} \cdot v^2 \cdot C \cdot v^3 \cdot \frac{dC}{ds} \quad [\text{W}] \quad (3.6)$$

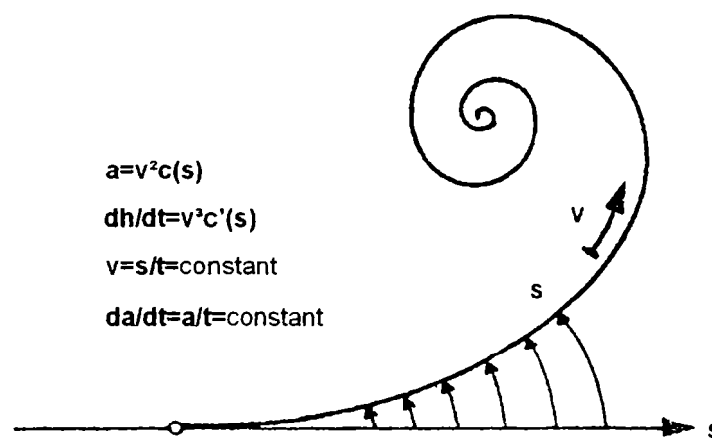
$$P = \frac{m^2}{D} \cdot a_c \cdot I_t \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

Rezultă că cea mai corectă apreciere asupra calității geometriei unei racordări se face prin produsul  $a_c \cdot I_t$ .

## 2. Puterea mecanică în racordările cu variația liniară respectiv în S a curburii

Până în prezent aprecierea unei racordări se face pe baza unor criterii geometrice și cinematice neluând în considerare caracteristici ca masa, forța, lucrul mecanic, puterea mecanică, deși doar acestea din urmă pot caracteriza corect condițiile de confort asigurate.

În cazul clotoidei atât curbura cât și accelerația centrifugă au variație liniară pe toată lungimea racordării, iar derivata acestora este constantă. Rezultă că singura deficiență majoră a clotoidei rămâne punctul RC, trecerea imperfectă din racordare în arcul de cerc. Dacă sporim lungimea clotoidei, accelerația transversală devine neplăcută, deși variația accelerației transversale (vectorul I) rămâne constantă (fig. 3.2)



**Fig. 3.2.** Clotoida;  $C(s)$  și  $a_c$  crește rapid dar variația lor este constantă în timp

Rezultă că vectorul I poate caracteriza o racordare dar nu poate determina lungimea acesteia. În practică, lungimea racordării este determinată de curbura maximă admisă în arcul de cerc respectiv accelerația transversală maximă admisă.

Pentru analiza caracteristicilor cinematice în cazul clotoidei se pornește de la relația ( 3.3 ):  $E_p = \frac{m^2 v^4}{2D} \cdot (C(s))^2$  [Nm]. Se poate observa ușor că lucrul mecanic efectuat în lungul racordării crește în raport cu pătratul drumului parcurs, adică mult mai rapid față de creșterea accelerației transversale. Dacă se analizează evoluția puterii mecanice, se constată că aceasta crește liniar și continuu în raport cu drumul parcurs pe lungimea racordării.

Rezultă că efectele cele mai nefavorabile asupra confortului apar la sfârșitul racordării, totodată în punctul AR atât lucrul mecanic cât și puterea mecanică sunt nule. Se poate concluziona că este greșit a se considera frânturile din diagrama curburii (C), a accelerației transversale ( $a_c$ ) sau a variației curburii (I) în punctele AR și RC ca și criterii hotărâtoare, de bază în aprecierea clotoidei. Cu atât mai mare este greșeala dacă clotoida este din start eliminată, ca fiind o racordare inacceptabilă din motivele sus-menționate.

Dezavantajul clotoidei, demonstrat prin calculul cinetic, rezultă din creșterea continuă a puterii mecanice în lungul racordării. Acest dezavantaj nu poate fi eliminat prin introducerea racordărilor având variația curburii în S, doar că valoarea maximă a puterii mecanice va avea o poziție intermediară (între AR și RC).

Se cunoaște că în efectuarea unui lucru mecanic este dezavantajoasă variația puterii mecanice. Rezultatul optim este obținut când puterea mecanică este constantă. Trebuie căutat în consecință o asemenea racordare pentru care puterea

mecanică (exprimată deja cu relațiile  $P = \frac{m^2 v^5}{D} \cdot C \cdot \frac{dC}{ds}$  și  $P = \frac{m^2}{D} \cdot a_c \cdot I_t$ ) rămâne

constantă pe toată lungimea racordării dacă viteza ( $v$ ) este constantă:

$$C(s) \cdot C'(s) = \text{constant} \quad (3.8)$$

Se consideră:

$$C(s) = s^n \quad \text{și} \quad C'(s) = n \cdot s^{n-1} \quad (3.9)$$

$$s^n \cdot n \cdot s^{n-1} = n \cdot s^{(2n-1)} = \text{constant} \rightarrow 2n-1 = 0 \rightarrow n = \frac{1}{2} \quad (3.10)$$

Rezultă:

$$C(s) = \sqrt{s} \quad (3.11)$$

Efectuând calculele matematice obișnuite pentru determinarea variației curburii pe lungimea racordării ( $L$ ) se obține o relație asemănătoare cu cea cunoscută deja în cazul clotoidei ( $C(s) = \frac{s}{RL}$ ):

$$C(s) = \frac{\sqrt{s}}{R\sqrt{L}} \quad [m^{-1}] \quad (3.12)$$

### 3. Geometria racordărilor cinetice

În ce privește racordările cinetice pot fi întâlnite două situații:

- curbe fără supraînălțare;
- curbe cu supraînălțare.

#### 3.1. Geometria racordărilor cinetice pentru curbe fără supraînălțare

Pentru curbele fără supraînălțare expresia curburii este dată de relația (3.13) în care  $R\sqrt{L}$  reprezintă parametrul racordării,  $L$  este lungimea acesteia,

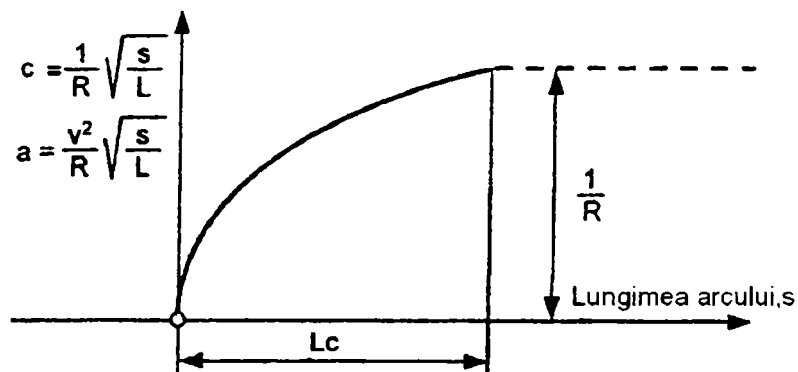
s este distanța măsurată pe racordare iar R este raza curbei. În locul razei de curbură se poate utiliza săgeata f care pentru o coardă de lungime 2a are valoarea:

$$f = \frac{a^2}{2C} = \frac{a^2}{2} C \quad [\text{m}] \quad (3.13)$$

Pentru coarda utilizată frecvent la verificarea curbelor de cale ferată (2a = 20m) se obține:

$$f = \frac{50\sqrt{s}}{R\sqrt{L}} \quad [\text{m}] \quad (3.14)$$

Diagrama curburii (sau a accelerației transversale) este prezentată în figura 3.3:

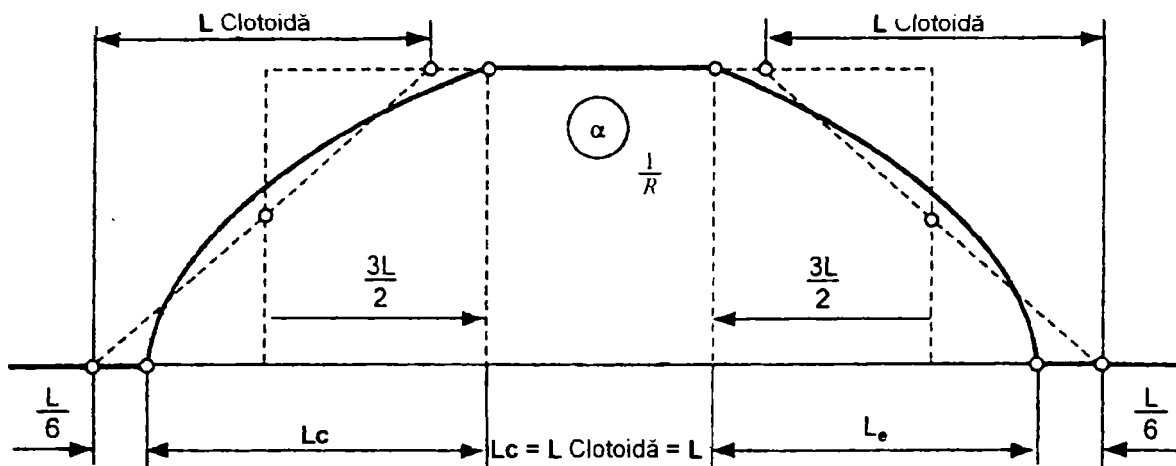


*Fig. 3.3. Diagrama C(s) sau a<sub>c</sub>*

Din diagrama 3.3 se poate observa că odată cu creșterea accelerației (forței) scade viteza de variație (derivata) acestuia iar puterea mecanică (produsul accelerației și a derivatei accelerației) rămâne constantă.

În figura 3.4 se reprezintă diagrama curburii pentru o curbă amenajată cu racordări parabolice (cu clotoide) împreună cu diagrama curburii pentru aceeași curbă amenajată cu racordări cinetice impunându-se condiția ca lungimile celor două tipuri de racordări să fie egale.





**Fig. 3.4.** Diagramele curburii pentru clotoide și racordări cinetice cu lungimi egale

Se observă că lungimea totală a curbei amenajate cu racordări cinetice scade

cu  $\frac{2L}{6} = \frac{L}{3}$

În continuare sunt prezentate relațiile matematice necesare pentru realizarea unei racordări cinetice:

- curbura:

$$\left(\frac{1}{\rho}\right)_c = (C)_c = \frac{\sqrt{s}}{R\sqrt{L}} = \frac{\sqrt{s}}{B} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (3.15)$$

unde B este parametrul racordării ( $B = R\sqrt{L}$ )

- diagrama unghiurilor:

$$\varphi_c^{\text{rad}} = \int \frac{\sqrt{s}}{R\sqrt{L}} \cdot ds = \frac{2}{3R\sqrt{L}} \cdot s^{3/2} \quad [\text{rad}] \quad (3.16)$$

sau

$$\varphi_c^{\circ} = \frac{2}{3R\sqrt{L}} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot s^{3/2} \quad [^{\circ}] \quad (3.17)$$

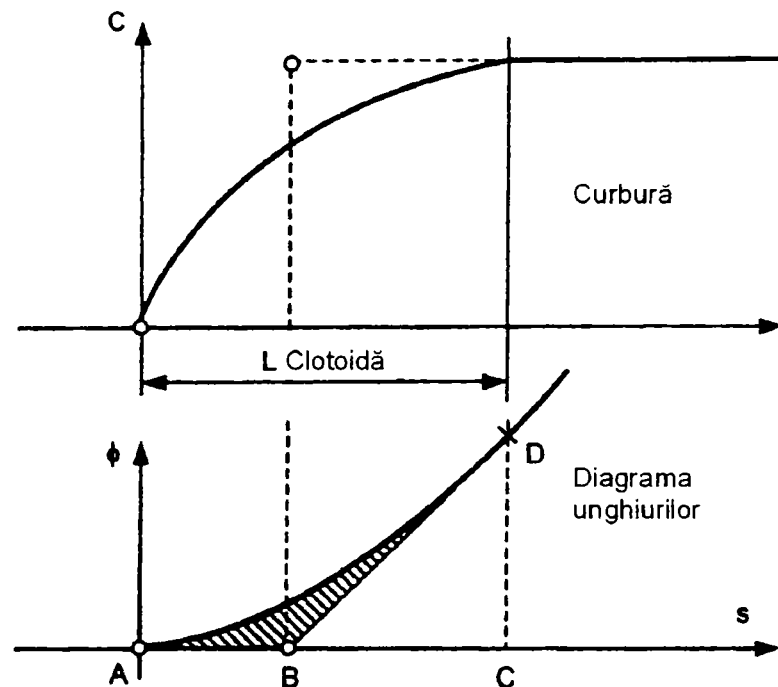
- ordonatele racordării:

$$y_c = \frac{2}{3R\sqrt{L}} \int s^{3/2} \cdot ds = \frac{4}{15R\sqrt{L}} \cdot s^{5/2} \quad [\text{m}] \quad (3.18)$$

- ordonata finală:

$$y_{\text{cRC}} = \frac{4}{15R\sqrt{L}} \cdot L^{5/2} = \frac{4L^2}{15R} \quad [\text{m}] \quad (3.19)$$

- deplasarea arcului de cerc central spre centrul curbei este reprezentată de suprafața ABD din figura 3.5.



*Fig. 3.5. Diagrama unghiurilor pentru racordările cinetice*

$$m_c = \text{ACD} - \text{BCD} = \text{ABD}$$

$$\text{ACD} = \frac{4L^2}{15R}; \quad \text{BCD} = \frac{2L^2}{9R};$$

$$m_c = \frac{L^2}{22.5R} \quad [\text{m}] \quad (3.20)$$

Se observă că deplasarea arcului de cerc central în cazul utilizării racordărilor cinetice ( $m_c$ ) este mai mare față de cazul clotoidei ( $m_3$ ) și mult mai mare față de cazul cosinusoidei ( $m_{\text{cos}}$ ):

$$m_{\cos} = \frac{L^2}{43.23R} < m_3 = \frac{L^2}{24R} < m_c = \frac{L^2}{22.5R} \quad (3.21)$$

În concluzie, după principiile germane de realizare a racordărilor, cele cinetice sunt cele mai avantajoase sau cosinusoidale sunt cele mai dezavantajoase, pentru aceeași lungime a racordării ( $L_{\cos} = L_3 = L_c = L$ ). Această concluzie rezultă din considerentul că administrația feroviară germană (DB) consideră că sporirea valorii deplasării  $m$  nu reprezintă nici un dezavantaj deoarece impune sporirea lungimii racordării și implicit scade variația curburii respectiv variația accelerației transversale (centrifuge). DB a impus în instrucția de specialitate limită minimă pentru deplasarea  $m$ .

### 3.2. Trecerea de la clotoidă la racordare cinetică

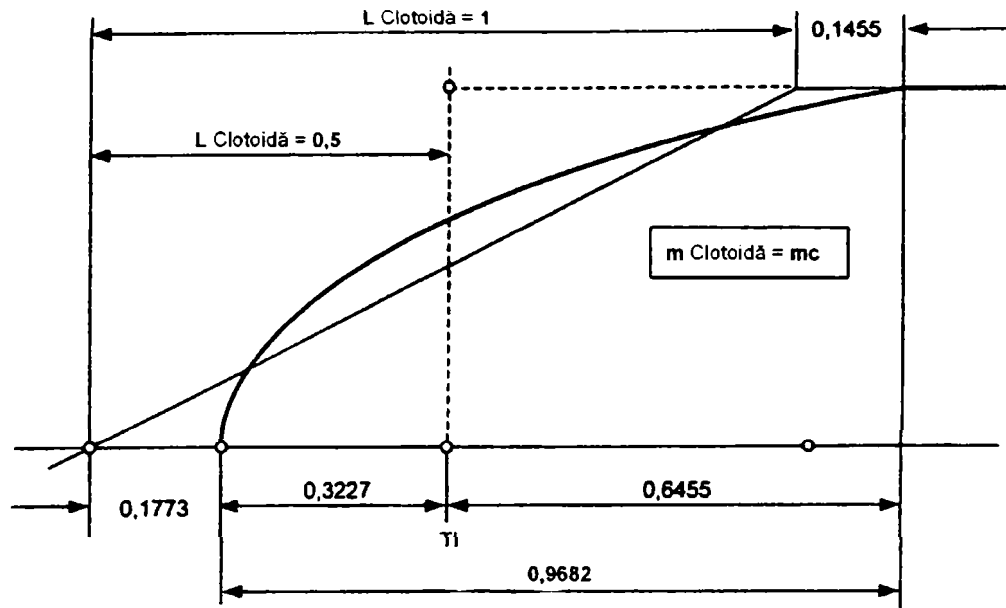
Condiția de trecere de la un tip de racordare la un alt tip de racordare este ca ripările necesare să fie minime, adică arcul de cerc central să nu-și schimbe poziția. Se recomandă ca trasarea curbei în vederea modificării tipului de racordare să se facă prin metoda diagramei unghiurilor (HÖFFER – SCHRAMM), deoarece ripările pot fi determinate direct și pot fi efectuate pe teren printr-o singură trecere a utilajelor grele de burat, nivelat și ripat calea moderne.

Pornind de la păstrarea poziției arcului de cerc central, rezultă lungimea racordării cinetice în raport cu lungimea clotoidei existente (fig. 3.6).

$$m_c = m_3 \rightarrow \frac{L_c^2}{22.5R} = \frac{L_3^2}{24R} \rightarrow L_c = 0,9682 L_3 \text{ [m]} \quad (3.22)$$

Se cunoaște că diferența între lungimea racordării și cea a proiecției acesteia pe tangentă poate fi neglijată în cazul curbelor cu raza  $R$  mare și cu racordări scurte. Din acest motiv se poate înlocui clotoida cu parabola de gradul trei dacă  $L/R \leq k$ . La CFR  $k = 0,2$  iar la DB,  $k = 0,25$ . Dacă  $k$  depășește valoarea limită  $k$

(în continuare considerată  $k = 0,25$ ) exactitatea calculului impuse dezvoltării în serie.



**Fig. 3.6.** Diagrama curburii pentru racordarea cinetică în comparație cu clotoida dacă deplasarea  $m$  rămâne aceeași

**Tabelul 3.1**

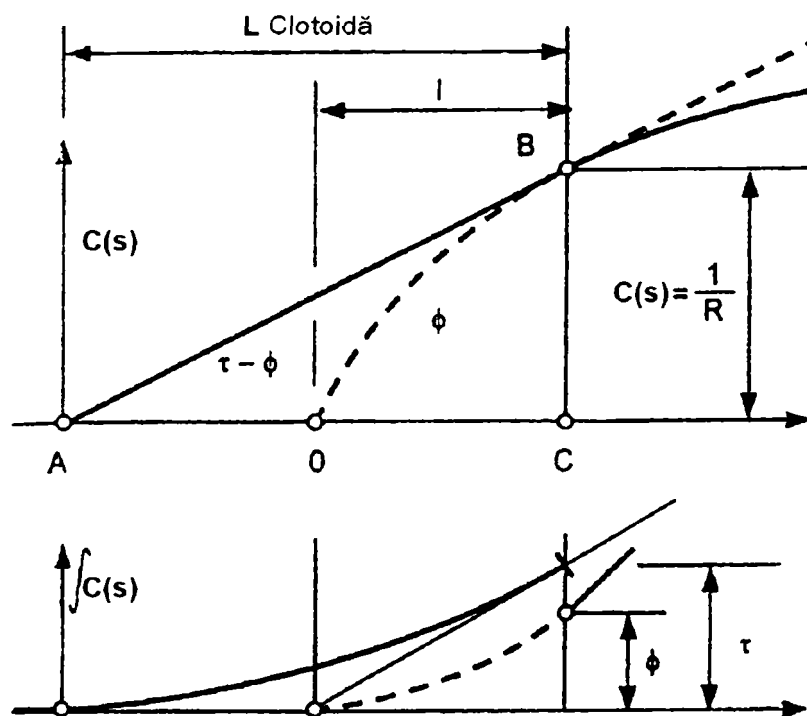
$k=L/R$	$x/L$	$y/L$
0,1	0,099994	0,000843
0,2	0,199911	0,004769
0,3	0,299550	0,013133
0,4	0,398579	0,026926
0,5	0,496536	0,046941
0,6	0,592832	0,073822
0,7	0,686758	0,108067
0,8	0,777489	0,150037
0,9	0,864108	0,199938
1,0	0,945608	0,257816

În tabelul 3.1 sunt date ordonatele rectangulare finale pentru racordările cinetice pentru diferite valori ale coeficientului  $k$ .

### 3.3. Geometria racordărilor cinetice pentru curbe cu supraînălțare

Din punct de vedere al accelerației transversale și al variației accelerației transversale este important ca raportul supraînălțare – accelerație transversală să fie constant pe toată lungimea racordării. În caz contrar nu se poate realiza nici variația favorabilă a accelerației transversale, nici constanța puterii mecanice.

La capătul racordării cinetice, diagrama curburii este perpendiculară pe abscisă ceea ce nu se poate accepta pentru rampa supraînălțării. Dacă vrem să respectăm condiția de proporționalitate a supraînălțării și curburii, problema se va rezolva prin introducerea unei racordări scurte tip clotoidă.



*Fig. 3.7. Diagramele curburii și supraînălțării pentru curma cinetică și pentru preclotoidă.*

În dreptul clotoidei intercalate preclotoidei atât supraînălțarea cât și curbura au variație liniară și poate fi tangentă la diagrama supraînălțării respectiv curburii corespunzătoare racordării cinetice. În figura 3.7 sunt prezentate aceste diagrame.

Din figura 3.7 rezultă următoarele relații:

$$L_{\text{clot}} = \overline{AB} = 2\overline{OB} \quad (3.23)$$

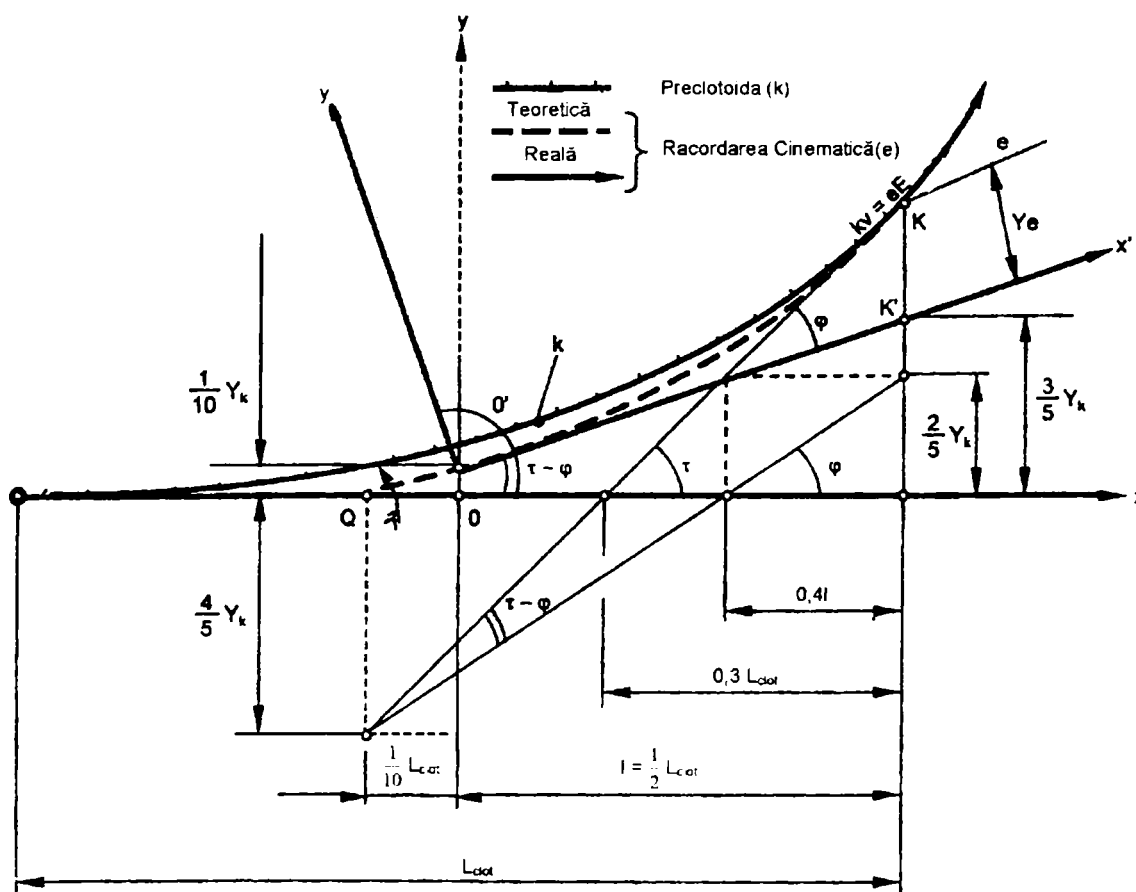
$$C_c = 1/R = \overline{BC} \text{ (egalitatea curburii în punctul C)} \quad (3.24)$$

$$S_{ABC} : S_{OBC} = 3:2 \quad (3.25)$$

$$S_{AOB} : S_{OBC} = 1:2 \quad (3.26)$$

$$\tau : \Phi = 3:2 \quad (3.27)$$

Ultima relație (3.27) arată că unghiul  $\tau$  format de tangenta în punctul C la preclotoidă cu abscisa reprezintă 3:2 din unghiul  $\Phi$  format de tangenta la racordare cinetică în același punct.



**Fig. 3.8.** Preclotoida și curba cinetică

În figura 3.8 este prezentată trasarea curbei cinetice cu preclotoidă și se observă o mică transformare a curbei cinetice reale față de cea teoretică.

Trasarea curbei cinetice cu preclotoidă, folosind notațiile din figura 3.8, se face astfel:

- se determină și se trasează pe teren coordonatele punctelor principale;
- se determină mijlocul arcului de cerc în sistemul de coordonate rotit și translatat;
- se determină coordonatele aceluiași punct față de punctul O;
- se intercalează preclotoida.

## CAP. IV. SUPRASTRUCTURA CĂII FERATE

Suprastructura căii ferate reprezintă partea din construcția unei căi ferate alcătuită, de regulă, din șine, aparate de cale, traverse, material mărunț de cale și prisma căii.

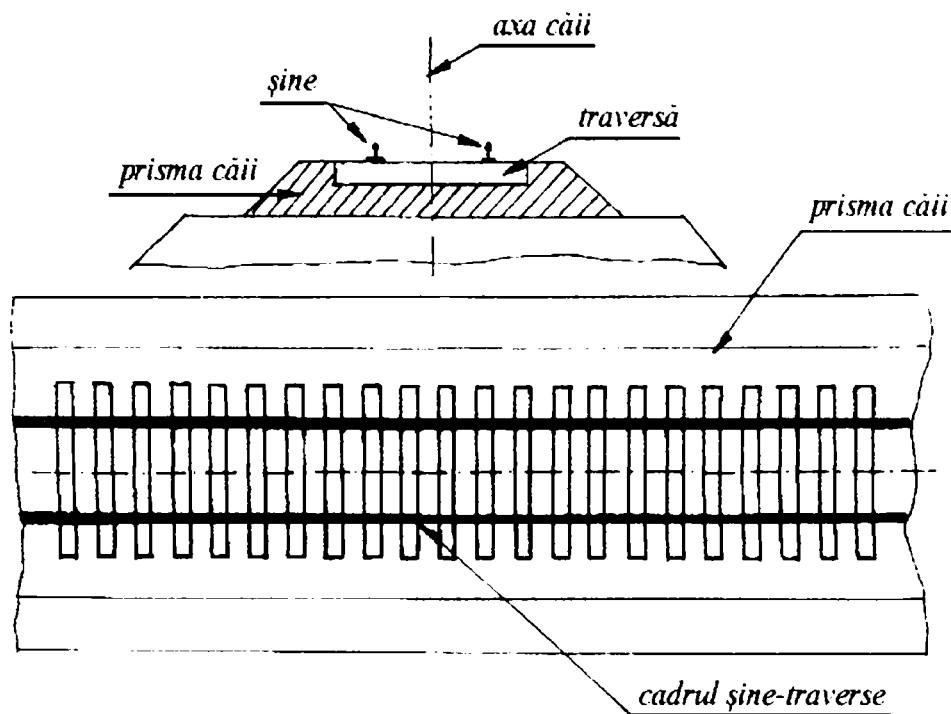
### 1. Șine

Suprastructura unei linii de cale ferată este deci acea parte a căii care se află deasupra nivelului platformei și reazemă pe aceasta. Suprastructura căii se compune din: șine, traverse, material mărunț de prindere (a șinelor de traverse și cel utilizat la realizarea joantelor) și prisma căii (fig. 4.1.).

Șinele constituie elementele principale ale suprastructurii căii. Au rolul de a susține și de a ghida materialul rulant, să preia și să transmită spre traverse sarcinile statice și dinamice provenite de la materialul rulant.

Forma actuală a șinei, numită șină tip Vignole, a fost inventată de inginerul american Stevens în 1832 și a fost utilizată în Europa pentru prima dată în 1836 de către inginerul francez Vignole. La începuturi au fost încercate multe tipuri de șină (în formă de U, de corniere, cu ciupercă dublă, în formă de U întors, etc.), acestea fiind înlocuite de șina tip Vignole având profilul format din ciupercă, inimă și talpă (fig. 4.2.).





**Fig. 4.1.** *Suprastructura liniei c.f. secțiune și vedere.*

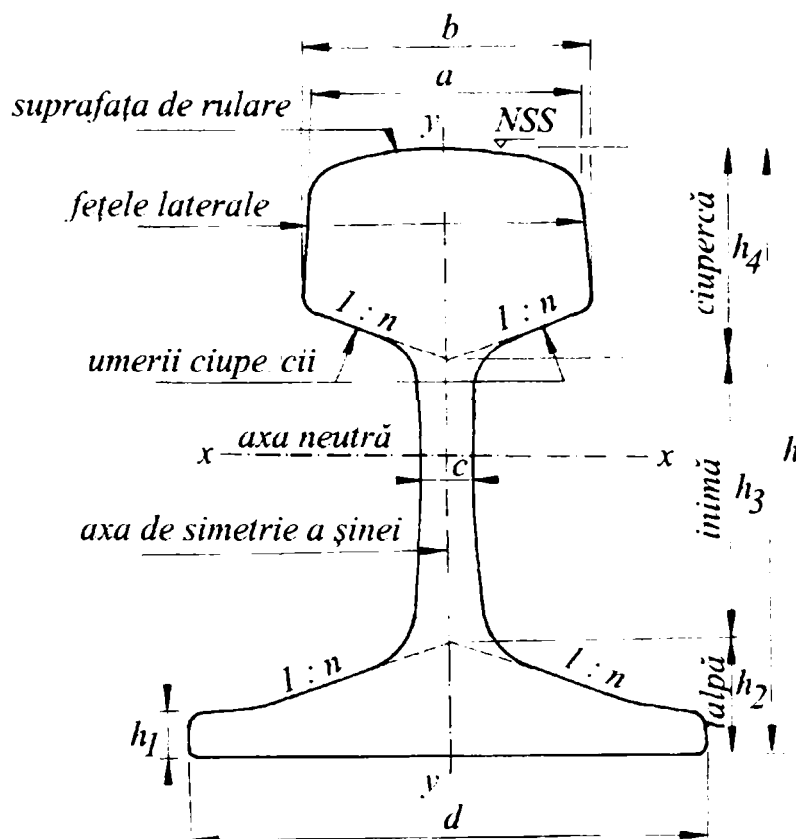
### 1.1. Analiza profilului șinei

Profilul șinei trebuie să satisfacă următoarele condiții:

- să aibă rezistență suficientă la încovoiere din forțe verticale ( $W_x$  mare,  $h$  mare);
- să aibă rezistență suficientă la întindere și compresiune (profil robust);
- să reziste la forțele orizontal-transversale ( $W_y$  mare,  $a$ ,  $b$  și  $d$  cât mai mari);
- să reziste la solicitările de torsiune ( $c$  cât mai mare);
- suprafața de rulare să asigure un contact optim între roată și șină;
- înălțimea ciupercii șinei să fie destul de mare pentru a avea o rezervă suficientă pentru uzura verticală;
- talpa șinei să fie cât mai lată pentru a asigura stabilitate cât mai mare și pentru a micșora presiunile transmise traversei;

- înălțimea șinei să fie cât mai redusă în comparație cu lățimea tălpii pentru asigurarea stabilității contra răsturnării;
- condițiile de laminare a șinei să fie cât mai bune;
- profilul șinei trebuie să fie cât mai economic.

În fig. 4.2. sunt prezentate elementele componente principale ale profilului șinei.



**Fig. 4.2.** Profilul șinei tip Vignole.

## 1.2. Elementele caracteristice ale șinelor de cale ferată

**Tipul șinei** reprezintă masa unui metru liniar din șina respectivă (în kg).

**Dimensiunile geometrice și caracteristicile de rezistență** mai importante sunt prezentate în tabelul 4.1. folosind și notațiile din fig. 4.2.

Coefficientul de stabilitate (  $K_1$  ) este definit astfel:

$$K_1 = \frac{d}{h} \quad (4.1)$$

Se recomandă pentru  $K_1$  valori în jur de 0,80.

Indicele de folosire a materialului (  $K_2$  ) poate fi definit prin relațiile:

$$K_2 = \frac{W_x}{G} \text{ sau } K_2 = \frac{W_x}{A} \text{ sau } K_2 = \frac{I_x}{G} \text{ sau } K_2 = \frac{I_x}{A} \quad (4.2)$$

**Tabelul 4.1.**

Tipul șinei	40	49	54E	60	65
Greutatea: G [daN/m]	40,00	49,43	53,81	60,34	64,64
Lățimea ciupercii: $a$ $b$ [mm]	$\frac{64}{64}$	$\frac{66,8}{70}$	$\frac{67}{70}$	$\frac{72}{74,3}$	$\frac{72,8}{75}$
Grosimea inimii: $c$ [mm]	13	14	16	16,5	18
Lățimea tălpii: $d$ [mm]	115	125	125	150	150
Înălțimea tălpii: $h_1/h_2$ [mm]	$\frac{9}{23,4}$	$\frac{10,5}{27,5}$	$\frac{12}{30,2}$	$\frac{11,5}{31,5}$	$\frac{11,2}{30}$
Înălțimea inimii: $h_3$ [mm]	66,6	70	79,4	89,5	105
Înălțimea ciupercii: $h_4$ [mm]	40	51,5	51,4	51	45
Înălțimea totală: $h$ [mm]	130	149	161	172	180
Aria secțiunii transversale: $A$ [cm <sup>2</sup> ]	50,96	62,97	68,55	76,86	82,56
Momentul de inerție: $I_x$ [cm <sup>4</sup> ]	1144,4	1819	2308	3055	3548
Momentul de inerție: $I_y$ [cm <sup>4</sup> ]	190,1	320	341,29	512,9	569
Modulul de rezistență: $W_{x1}$ [cm <sup>3</sup> ]	181	248,2	297,77	377,4	436
Modulul de rezistență: $W_{x2}$ [cm <sup>3</sup> ]	172,1	240,3	276,37	355,6	359
Modulul de rezistență: $W_y$ [cm <sup>3</sup> ]	33	51,2	54,6	68,4	76
Coeficient de stabilitate: $d/h$ [ ]	0,88	0,84	0,77	0,84	0,83
Indice de folosire a materialului: $W_{x \min} / G$	4,3	4,9	5,08	5,55	5,55
Lungimi normale [m]	15,00 22,50 30,00	12,50 15,00 25,00 30,00	15,00 22,50 25,00 30,00	15,00 22,00 25,00	12,50 25,00

Lungimea șinelor, pentru calea cu joante corespunde de regulă pentru temperatura de +20°C. Conform instrucției 314/1989 există următoarele patru categorii de lungimi:

- lungimi normale;
- lungimi normale scurtate (scurtimi) folosite la firul interior al curbelor;

- lungimi subnormale;
- lungimi speciale (la aparatele de cale).

În tabelul 4.2. sunt prezentate câteva lungimi normale și scurtimi standardizate:

**Tabelul 4.2.**

<b>Lungime normală [m]</b>	<b>Scurtimi [m]</b>
15	14,930; 14,870
22,5	22,445; 22,390; 22,335
25	24,920; 24,835
30	29,900; 29,800; 29,700

*Materialul* din care sunt realizate șinele este un oțel de calitate care trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- șinele să fie rigide dar și elastice;
- suprafața de rulare să fie cât mai dură, cât mai rugoasă dar și cât mai netedă;
- oțelul să fie rezistent și tenace, etc.

Pentru exemplificare se prezintă rețeta pentru compoziția chimică a oțelului din șină, fabricat prin procedeul Simens - Martin:

- carbon: min. 4,6 ... 6,2 ‰
- mangan: min. 6 ‰
- siliciu: max. 3 ‰
- fosfor: max. 0,6 ‰
- sulf: max. 0,6 ‰
- fosfor + sulf: max. 1 ‰

Din punct de vedere al compoziției chimice rezistența la rupere a oțelului din șine, respectiv limita de curgere este influențată în primul rând de conținutul de carbon, dar și de conținutul de mangan și de siliciu. Vanadiul și cromul

influențează pozitiv rezistența la rupere, dar conținutul lor în oțel este limitat. Prelucrabilitatea este influențată de vanadiu și mangan, dar amândouă micșorează sudabilitatea oțelului. Conținutul de siliciu, fosfor și sulf trebuie limitat, iar în cazul oțelurilor dure este necesară utilizarea unor aliaje cu crom și titan.

În figura 4.3 este prezentată influența carbonului asupra rezistenței la rupere, a limitei de curgere și a alungirii specifice a oțelului.

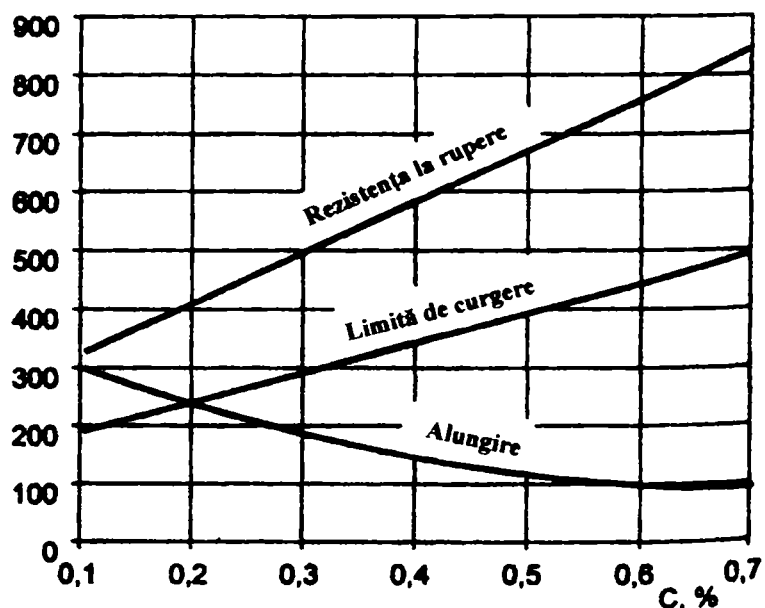


Fig. 4.3. Influența conținutului de carbon asupra calității oțelului

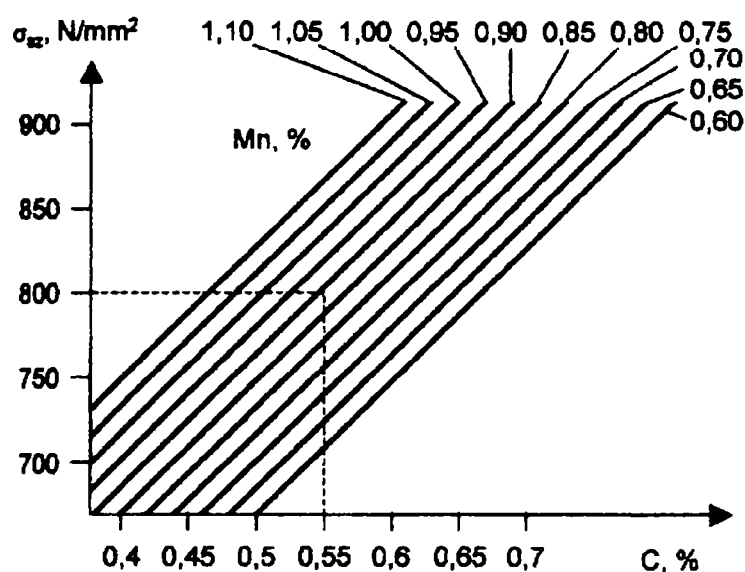


Fig. 4.4. Rezistența la rupere a oțelului în funcție de conținutul de C și Mn

În figura 4.4 este prezentată rezistența la rupere a oțelului din șine în funcție de conținutul de carbon (C) și mangan (Mn).

În tabelul 4.3 sunt prezentate caracteristicile mecanice de bază respectiv compoziția chimică pentru unele oțeluri utilizate azi la fabricarea șinelor.

**Tabelul 4.3.**

Caracteristici mecanice		Elementele aliajului ( masă %)					
Rezistența la rupere [N/mm <sup>2</sup> ]	Alungire [%]	C	Si	Mn	P	S	Cr
<b>1. Șină de calitate normală după UIC 860-V</b>							
700-850	≥ 14	0,4 - 0,6	≤ 0,35	0,8 - 1,2	≤ 0,05	≤ 0,05	-
<b>2. Șină de calitate normală</b>							
≥ 800	≥ 12	0,6 - 0,63	≤ 0,5	0,8 - 1,3	≤ 0,05	≤ 0,05	-
<b>3. Șină din oțel tare, rezistență la uzură după UIC 860-V</b>							
Calitatea A ≥ 900	≥ 10	0,6 - 0,75	≤ 0,5	0,8 - 1,3	≤ 0,05	≤ 0,05	-
Calitatea B ≥ 900	≥ 10	0,5 - 0,7	≤ 0,5	1,3 - 1,7	≤ 0,03	≤ 0,05	-
Calitatea C ≥ 900	≥ 10	0,45 - 0,65	≤ 0,4	1,7 - 2,1	≤ 0,03	≤ 0,05	-
<b>4. Șină de calitate superioară, din aliaj Cr-Mn foarte tare</b>							
≥ 1100	≥ 9	0,65 - 0,8	≤ 0,7	0,8 - 1,3	≤ 0,03	≤ 0,03	0,8 - 1,3
<b>5. Șină de calitate superioară, din aliaj Cr-Ti foarte tare</b>							
≥ 900	≥ 10	0,45 - 0,65	≤ 0,4	1,7 - 2,1	≤ 0,02	≤ 0,03	-

În tabelul 4.4 este prezentată influența călirii asupra caracteristicilor mecanice ale oțelurilor din șine cu conținut de crom și mangan.

**Tabelul 4.4.**

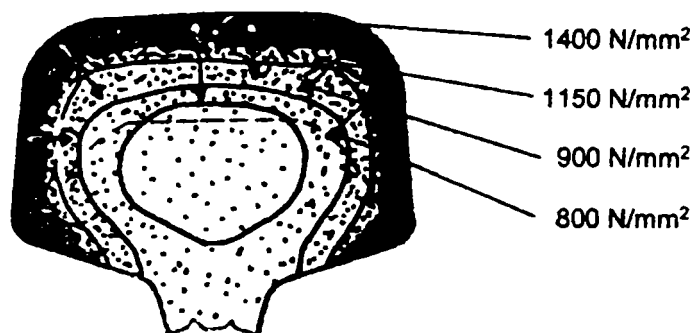
Caracteristici mecanice	Fără călire	Cu călire
Rezistență la rupere $\sigma_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	860... 1020	1140... 1390
Limita de curgere $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	480... 620	750... 1040
Alungirea specifică [%]	4... 9	6... 15
Contractie [%]	5... 17	25... 50
Duritatea suprafeței HB	245... 270	331... 385

Călirea șinelor se poate realiza:

- pe întreaga secțiune transversală;

- doar în zona suprafețelor de rulare (superioară și laterală).

În figura 4.5 este prezentată evoluția rezistenței la rupere în cazul unei șine având ciuperca răcită forțat (călită) în apă sau ulei. Stratul superior are grosime de 10 mm.



**Fig.4.5.** Rezistența la rupere în secțiunea ciupercii

Găurirea șinelor în vederea realizării joantelor depinde de tipul șinei. Poziția și diametrul găurilor la capetele șinelor (fig. 4.6.) are valorile prezentate în tabelul 4.5. Sunt prezentate și diametrul găurii în eclisă ( $\phi_e$ ), diametrul șurubului orizontal ( $\phi_b$ ), rostul maxim teoretic ( $r_{max}$ ) și rostul maxim real ( $r_{max}^r$ ) pentru câteva tipuri uzuale de șină.

**Tabelul 4.5.**

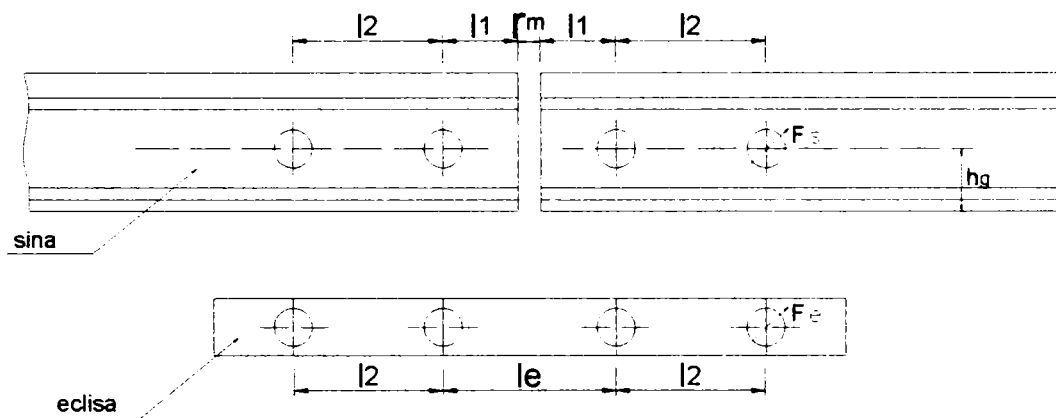
Tip șină	$l_1$ mm	$l_2$ mm	$l_e$ mm	$\phi_s$ mm	$\phi_e$ mm	$\phi_b$ mm	$r_{max}$ mm	$r_{max}^r$ mm	$h_g$ mm
40	56	165	120	30 (33)	24	22	20 (23)	18 (21)	60
49	46	165	100	30 (33)	26	24	16 (19)	16(19)	62,5
54	66	200	140	27,5 (30,5)	25	22	17 (20)	16,5 (19,5)	70
60	61	165	130	30 (33)	27	24	18 (21)	17 (20)	76,25
65	96	220	200	36	29	27	22	19	78,50

În cazurile extreme, la temperatura minimă (rost maxim) și la cea maximă (rost minim), găurile din șină și din eclise trebuie să fie tangente la secțiunea bulonului (fig. 4.7.).

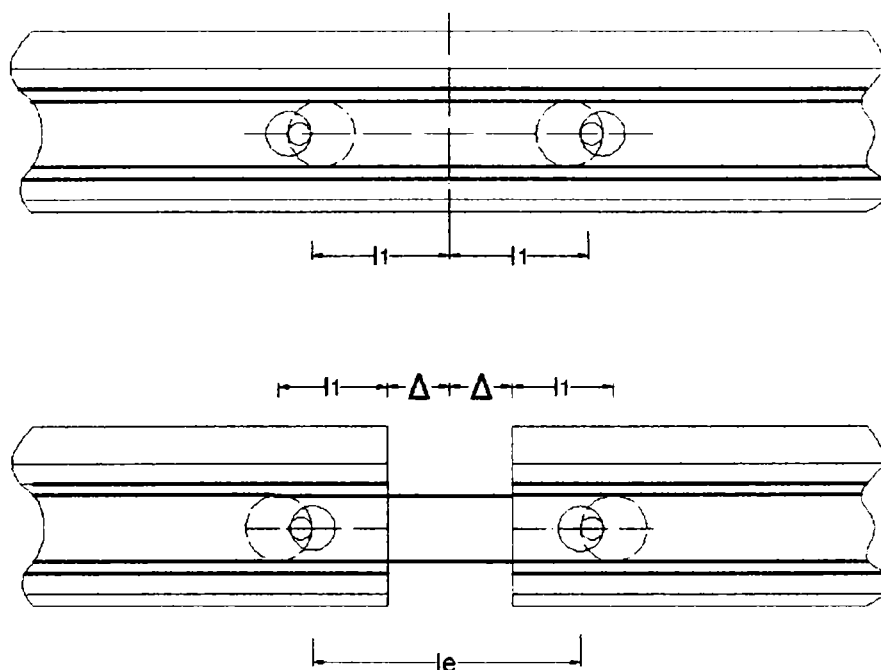
$$\Delta = (\phi_s - \phi_b) + (\phi_e - \phi_b) \quad (4.3)$$

$$\Delta = \phi_s + \phi_e - 2\phi_b \quad (4.4)$$

$$r_{\max} = 2 \cdot \Delta = 2 \cdot (\phi_s + \phi_e - 2\phi_b) \quad (4.5)$$



**Fig. 4.6.** Găurirea capetelor de șină.



**Fig. 4.7.** Rostul maxim și minim.



În realitate, rostul maxim este ceva mai mic și rezultă din deplasarea maximă posibilă în cazul extrem față de cazul mediu (gaura din șină, gaura eclisei și bulonul sunt coaxiale) și din valorile lui  $r_m$ :

$$r_{\max}^r = 2 \cdot \Delta^r = \phi_s + \phi_e - 2\phi_b + r_m \quad (4.6)$$

## 2. Material mărunt de cale

Prin material mărunt de cale se înțelege materialul destinat prinderii șinelor de traverse și pentru legarea șinelor între ele, dispozitivele contra deripării căii și materialul utilizat contra fugirii șinelor.

### 2.1. Prinderea șinelor de traverse

Prinderea șinelor de traverse se clasifică după mai multe criterii:

- după sistemul constructiv (simple, directe, mixte, indirecte);
- după natura traverselor (prinderi pentru traverse din lemn, beton sau metal);
- după tipul șinei (de exemplu: prindere tip 49);
- după modul în care prinderile se opun deplasărilor relative ale șinei față de traversă (rigide, semielastice, elastice).

Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească o prindere sunt următoarele:

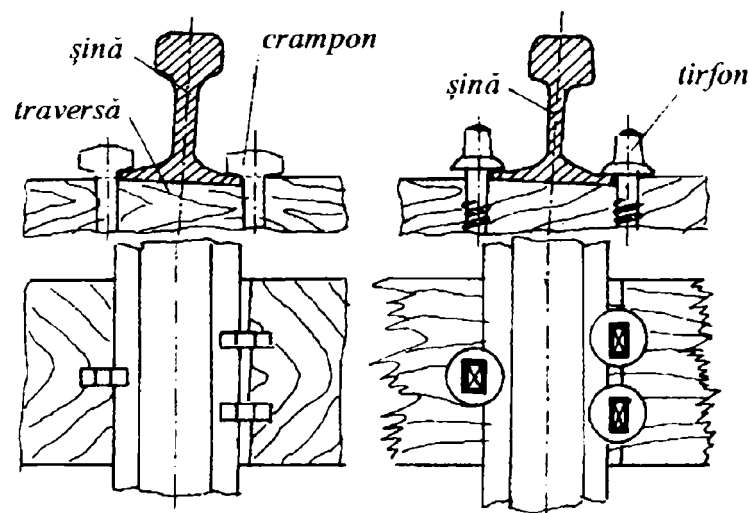
- să reziste la acțiunea forțelor orizontale transversale, adică să asigure menținerea ecartamentului;
- să reziste la acțiunea forțelor verticale statice și dinamice;
- să asigure repartizarea corespunzătoare a presiunii pe fața superioară a traversei;

- să reziste la acțiunea forțelor orizontale longitudinale, deci să împiedice fugirea șinelor;
- să aibă durata de serviciu cât mai mare;
- să nu slăbească în timpul exploatării;
- să permită deformațiile elastice ale șinelor;
- să permită montarea și demontarea ușoară a căii;
- controlul calității prinderii să se facă ușor;
- să asigure rigiditatea corespunzătoare cadrului șină-traversă în plan orizontal pentru prevenirea șerpuirii sau deripării;
- piesele prinderii să fie simple, cât mai puține la număr, ușor de fabricat și cât mai ieftine.

### 2.1.1. Prinderi simple

Prinderea simplă este rigidă și nu permite deplasări elastice relative ale șinei față de traversă decât cu condiția deformației remanente a prinderii.

Șina este așezată direct pe traversă și se fixează prin crampoane sau tirfoane (fig. 4.8.).

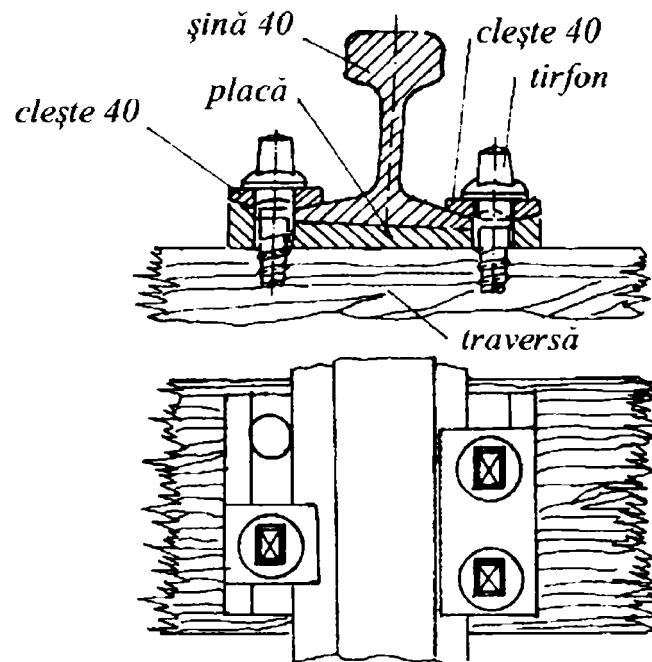


**Fig. 4.8 . Prinderi simple.**

Înclinarea de 1:20 a șinelor spre interiorul căii se realizează prin sabotarea traverselor din lemn. Deoarece rezistența la forfecare este, în general, mai mare decât rezistența la smulgere, în interiorul căii se folosesc două crampoane (tirfoane), iar în exteriorul căii un singur element de prindere. Acest tip de prindere se utilizează rar și corespunde unor tipuri de șină ușoare (9,3; 13,75; 15,8; 17,65; 18; 23,6; 30; 33,48; 34,5).

### 2.1.2. Prinderi directe

Pentru prevenirea și împiedicarea strivirii feței superioare a traversei, a distrugerii acesteia și pentru a menține cât mai mult timp prinderea eficientă, între talpa șinei și traverse se introduc plăci metalice suport. Aceste plăci repartizează forțele verticale pe suprafețe mai mari, reducându-se astfel presiunile. Totodată, sporește rezistența la rotirea șinelor în prinderi și, implicit, rigiditatea cadrului șină-traversă.



*Fig. 4.9. Prindere directă 40 TL.*

Prinderea directă se caracterizează prin aceea că atât șina cât și placa suport sunt prinse de traversă cu aceleași elemente de prindere – de obicei tirfoane, mai rar crampoane. Prinderea directă se folosește la suprastructuri tip 23,6; 34,5; 40 și 42,8. În fig. 4.9. este prezentată o prindere tip 40 pe traverse din lemn.

### **2.1.3. Prinderea mixtă**

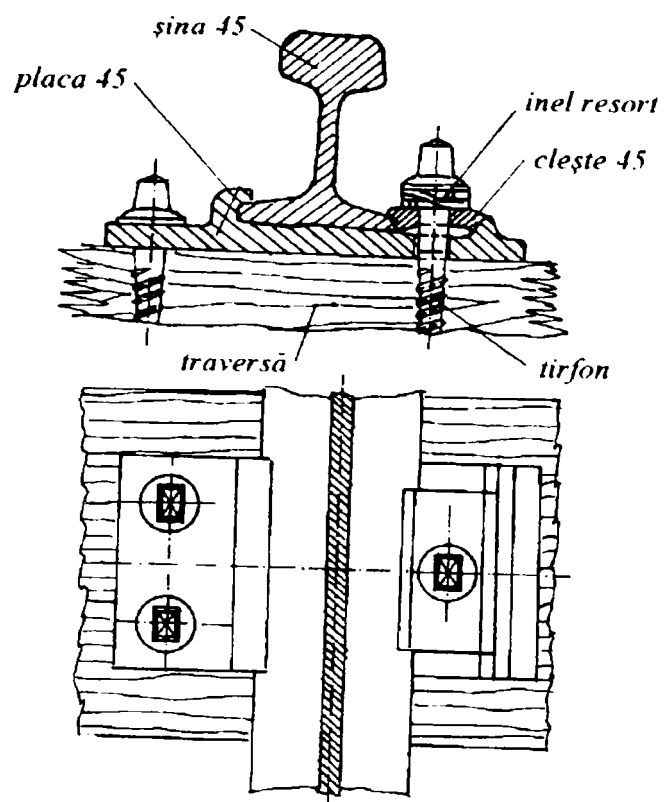
Prinderea mixtă este o prindere semidirectă folosită la suprastructura tip 45. Este caracterizată prin faptul că în exteriorul căii placa este prinsă cu ajutorul a două tirfoane, șina fiind fixată prin intermediul unei grife de placă, iar în interiorul căii atât șina cât și placa sunt prinse cu un singur tirfon prin intermediul unui clește tip 45 (fig. 4.10.).

Prinderea mixtă elimină o mare parte a neajunsurilor prinderilor directe, cu excepția neasigurării prevenirii deplasării în lung (fugirii) șinelor.

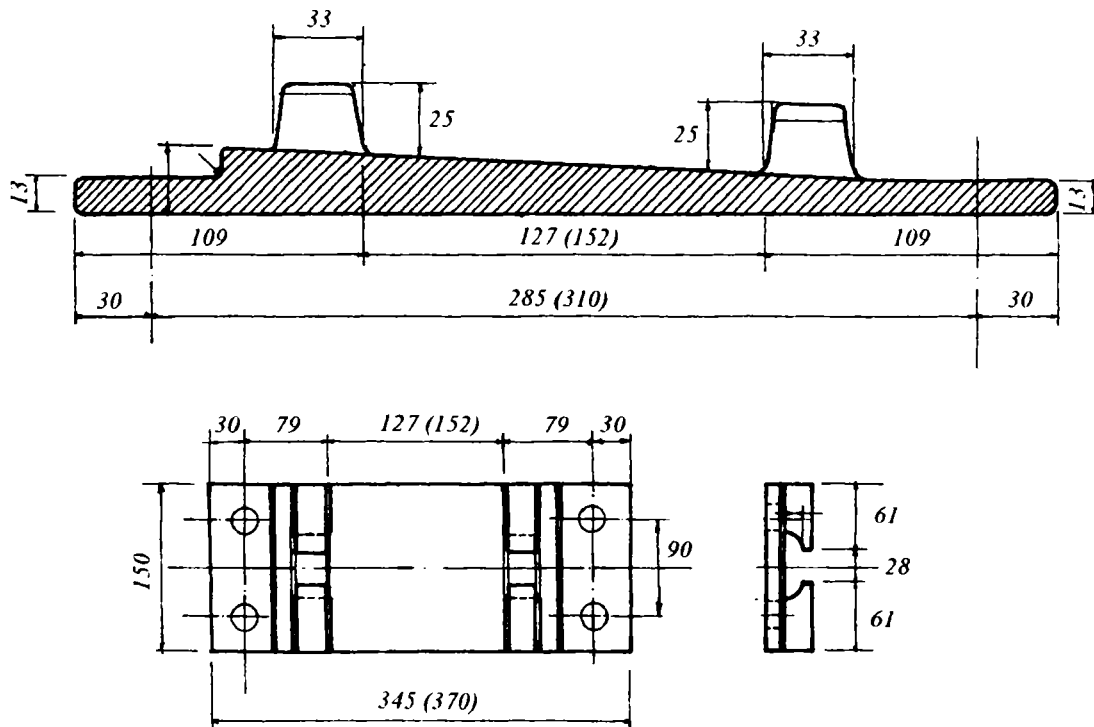
### **2.1.4. Prinderea indirectă**

Această prindere, aplicată pentru prima dată în Germania în anul 1926, este una din cele mai bune, fiind cunoscută și sub denumirea de prindere K sau prindere GEO. Prinderea indirectă la CFR este utilizată la toate tipurile de șine grele (49; 54E; 60 și 65).

Placa suport cu nervuri (reborduri) se realizează cu sau fără înclinare. Cele fără înclinare sunt utilizate la liniile tip 60 sau 65 pe traverse din beton (care au înclinarea de 1:20 în zona de rezemare a plăcii suport), la construcția aparatelor de cale, etc. În fig. 4.11. este prezentată placa metalică tip 49 (între paranteze sunt notate dimensiunile pentru placa tip 60) cu *înclinare*.

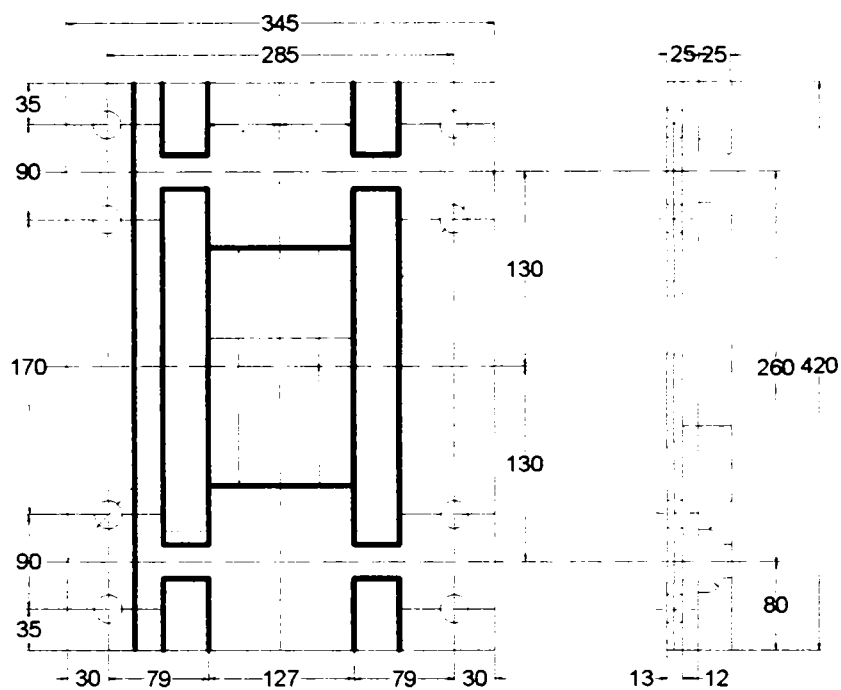


**Fig. 4.10.** Prindere tip 45.

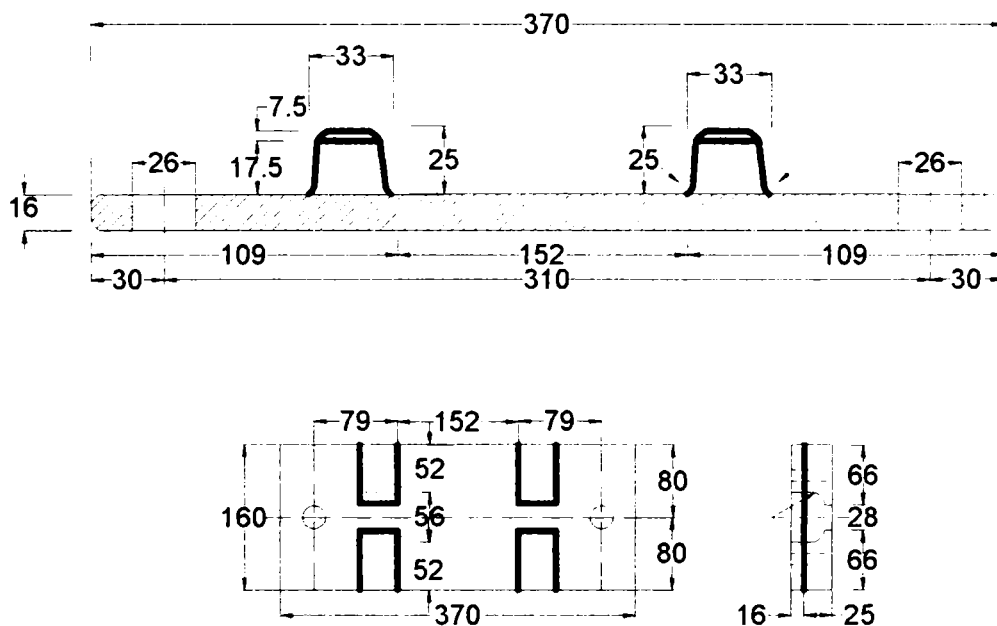


**Fig. 4.11.** Placă metalică tip 49 (60) cu înclinare.

La joantele liniilor tip 49 (sau 54E) se folosesc plăci pod cu decupare (fig. 4.12.).



**Fig. 4.12.** Placă pod tip 49 cu decupare.



**Fig. 4.13.** Placă metalică tip 60 (65) fără înclinare.

În fig. 4.13. este prezentată o placă metalică suport fără înclinare utilizată la suprastructuri tip 60 sau 65 pe traverse din beton T16 sau T17.

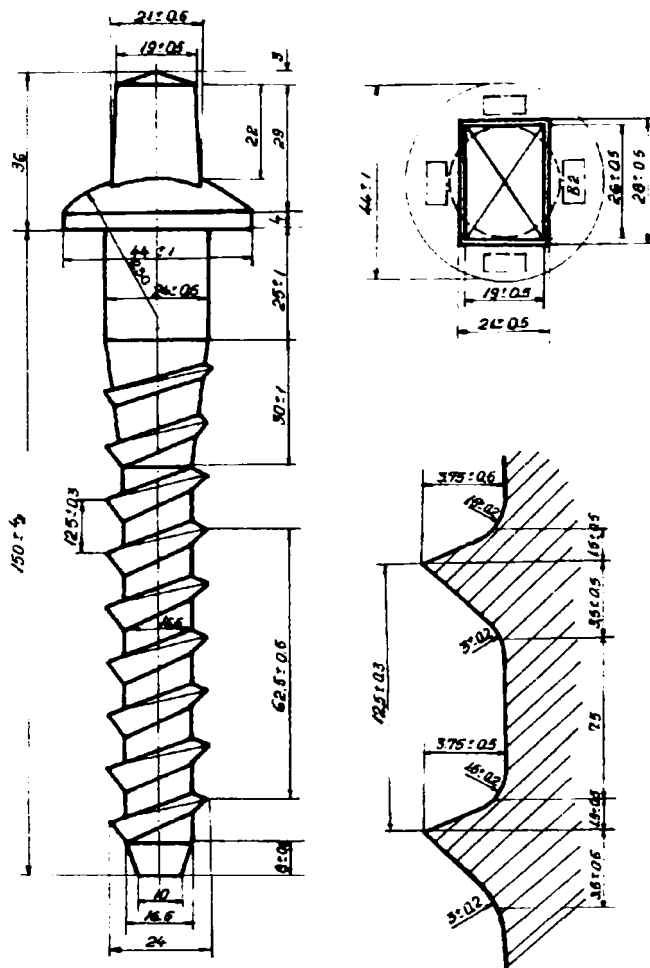


Fig. 4.14. Tirfoane B2.

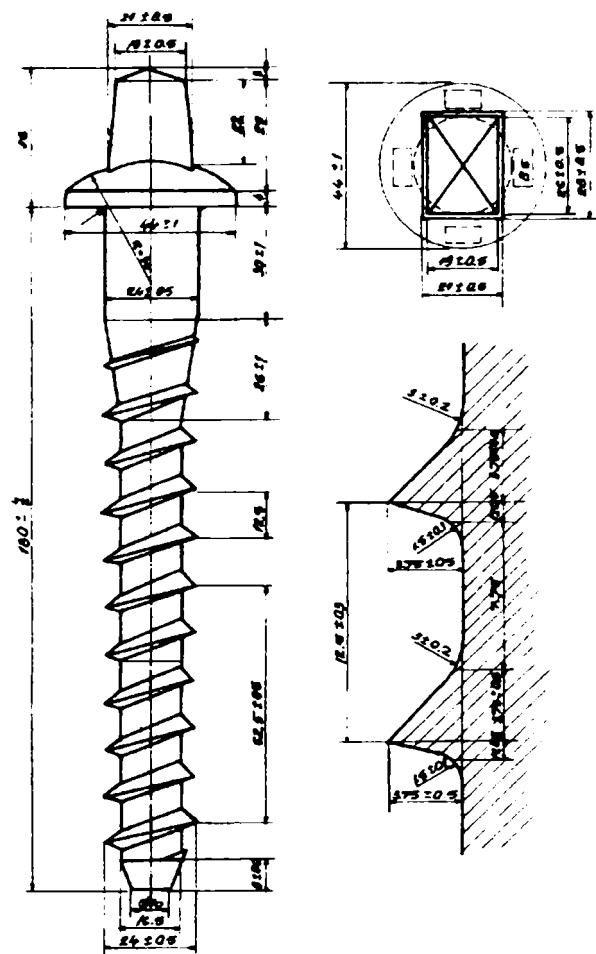
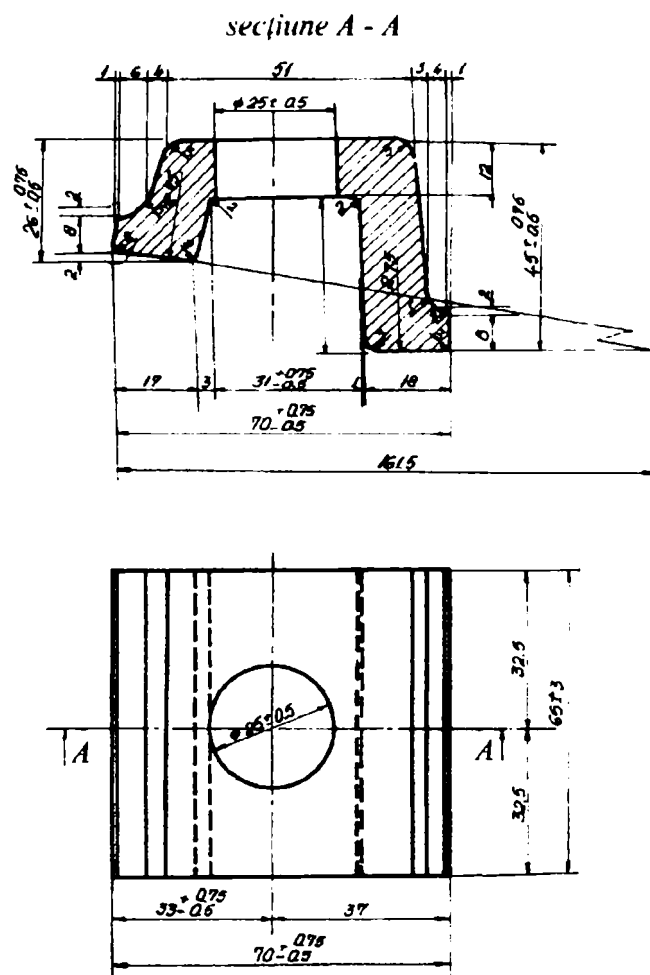


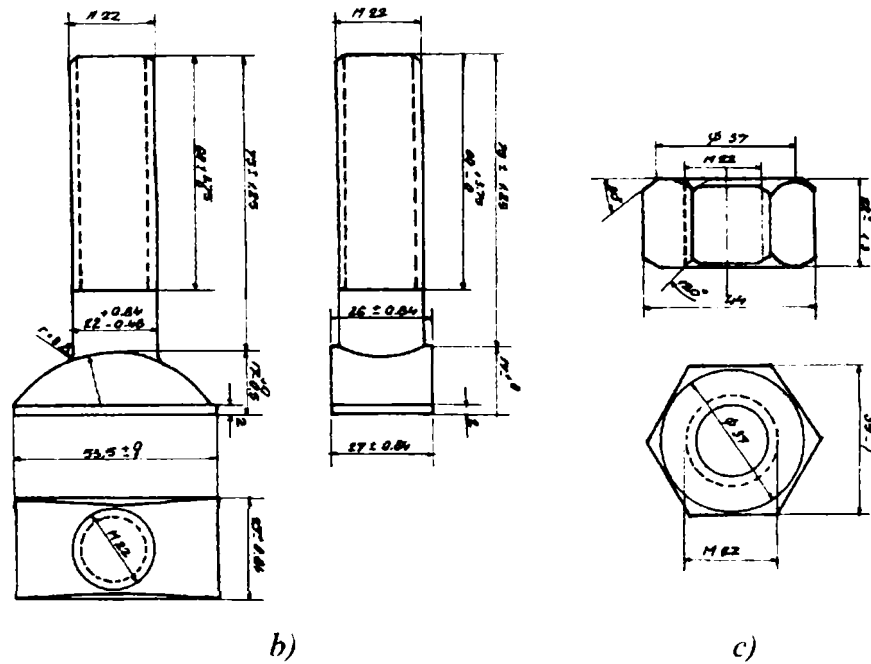
Fig. 4.15. Tirfoane B5.

Fixarea plăcilor de traversele de lemn se face cu patru tirfoane tip B2 (fig. 4.14), iar de traversele din beton, cu două (eventual patru) tirfoane B5 (fig. 4.15).

Cleștele tip 49 (fig. 4.16) se folosește la prinderea tuturor tipurilor de șină (49; 54E; 60 și 65). Piciorul mai scurt al cleștelui reazemă pe talpa șinei, iar cel lung, pe placa suport. Buloanele verticale (fig. 4.17.a.) au capul sub formă de coadă de rândunică. Pentru liniile tip 49 (54E)  $l_1 = 50$  mm iar  $l_2 = 65$  mm. La liniile tip 60 (65)  $l_1 = 60$  mm iar  $l_2 = 75$  mm. Buloanele verticale poartă denumirea SIM 22x70 (75), iar piulița hexagonală utilizată este de tip BM 22x22 (fig. 4.17.b.)



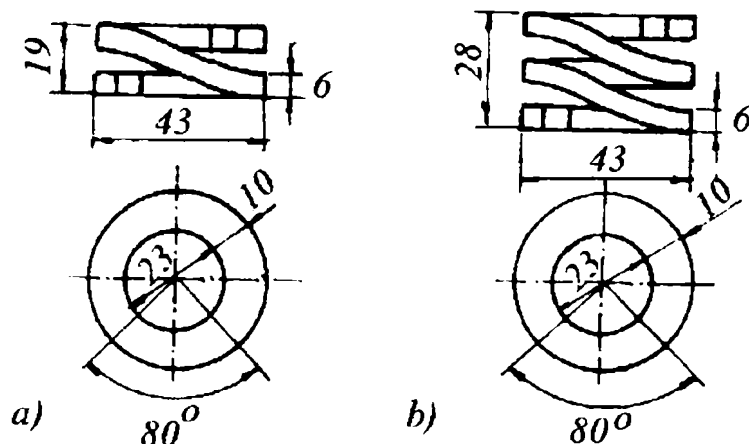
**Fig. 4.16.** Elemente de prindere a șinei de traverse. Clește 49.



**Fig. 4.17.b și c.** Elemente de prindere a șinei de traverse. Buloane verticale.



Înelele resort interpuse între piuliță și clește împiedică desfacerea piulițelor din cauza vibrațiilor și sporesc elasticitatea prinderii. La liniile tip 49 (54E) se folosesc inele resort duble B 23 (fig. 4.18.a.), iar la tipul 60 (65) inele triple C 23 (fig. 4.18.b.).



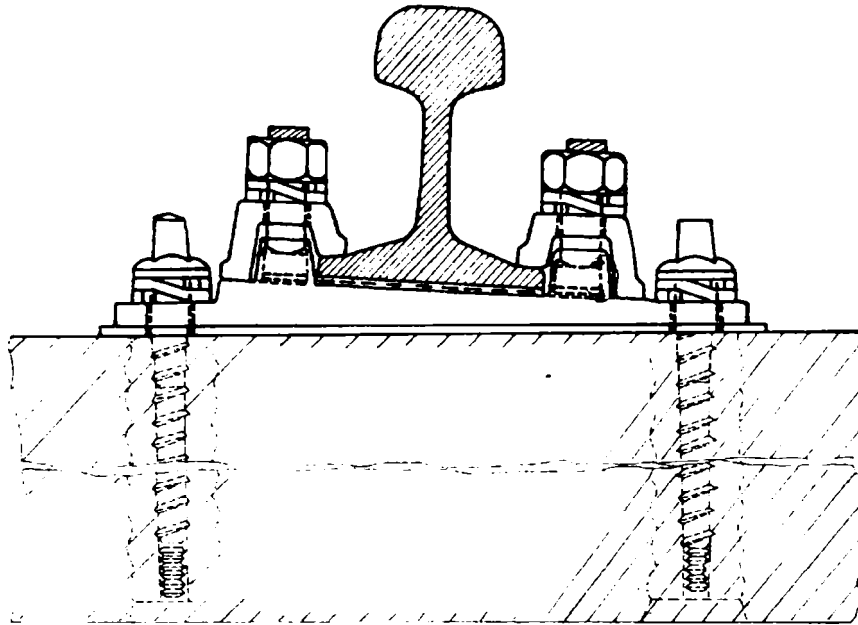
**Fig. 4.18.** Inele resort.

Între talpa șinei și placa metalică se introduce o plăcuță de cauciuc (K-49-L; K-49-B; K-60-L; K-60-B), iar între placa metalică și traversă se așează o placă de polietilenă calandrată K-49 sau K-60. Acestea asigură un spor de elasticitate prinderii, împiedică fugirea șinelor și asigură o rezemare mai bună a plăcii metalice pe traverse. În fig. 4.19. este prezentată o prindere tip 49 pe o traversă din beton.

Prinderea indirectă are următoarele avantaje:

- reduce posibilitatea de vibrare a plăcilor;
- montarea plăcilor se poate realiza în condiții industriale;
- șinele pot fi înlocuite fără demontarea plăcilor;
- se realizează o strângere puternică;
- fugirea șinelor este împiedicată;
- rigiditatea cadrului șine-traverse în sens transversal crește foarte mult;
- este ușor de realizat, verificat, întreținut și reparat.

Marele dezavantaj al prinderii indirecte este acela că necesită o cantitate mare de oțel.



*Fig. 4.19. Prinderea indirectă.*

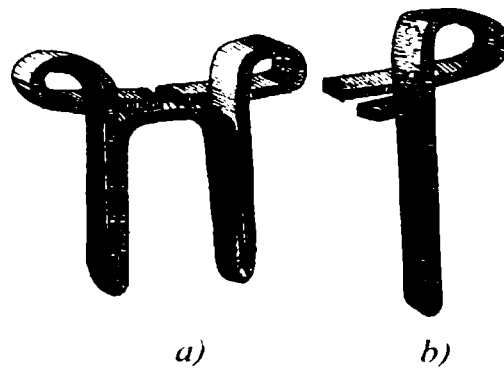
### **2.1.5. Prinderi elastice**

Din marea varietate a prinderilor elastice folosite la administrațiile feroviare din lume, în continuare sunt prezentate următoarele tipuri semnificative:

- prinderi cu crampoane elastice;
- prinderi cu tirfoane și clești elastici;
- prinderi cu cleme elastice;
- prinderi cu agrafe elastice.

*Crampoanele elastice* au capul în formă de arc și apasă talpa șinei indiferent de sarcina verticală pe șină. Marele dezavantaj al acestor crampoane este acela că rezistența la smulgere este mică iar oțelurile folosite pentru realizarea lor trebuie

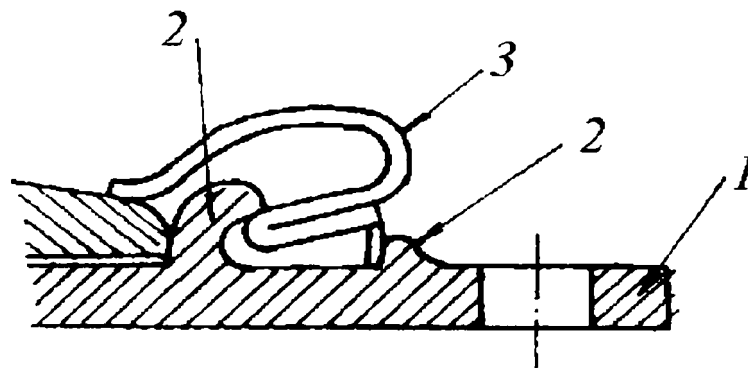
să fie de calitate superioară. În fig. 4.20.a. este prezentat *cramponul Beta*, iar în fig. 4.20.b. *cramponul I-flex*.



**Fig. 4.20.** Prinderi cu crampoane elastice.

O prindere elastică cu tirfoane și clești elastici, denumită Hey-Bak, a fost experimentată în Anglia. Placa metalică (1) are reborduri speciale (2) în care se sprijină cleștii elastici (3) având forma arcuită (fig. 4.21.). Cleștii sunt introduși prin izbire, iar placa metalică se prinde de traversă cu ajutorul tirfoanelor.

Această prindere are placa metalică masivă și cu o formă complicată, iar cleștii din oțeluri speciale. Înlocuirea unei șine este greoaie, deoarece trebuie scoși toți cleștii. Aceste inconveniente au dus la utilizarea extrem de redusă a prinderii elastice cu tirfoane și clești elastici.



**Fig. 4.21.** Prinderea elastică Hey-Bak.

Prinderile cu cleme elastice sunt răspândite. Prima clemă elastică a fost cea de tip RN și a fost utilizată în Franța (fig. 4.22.).

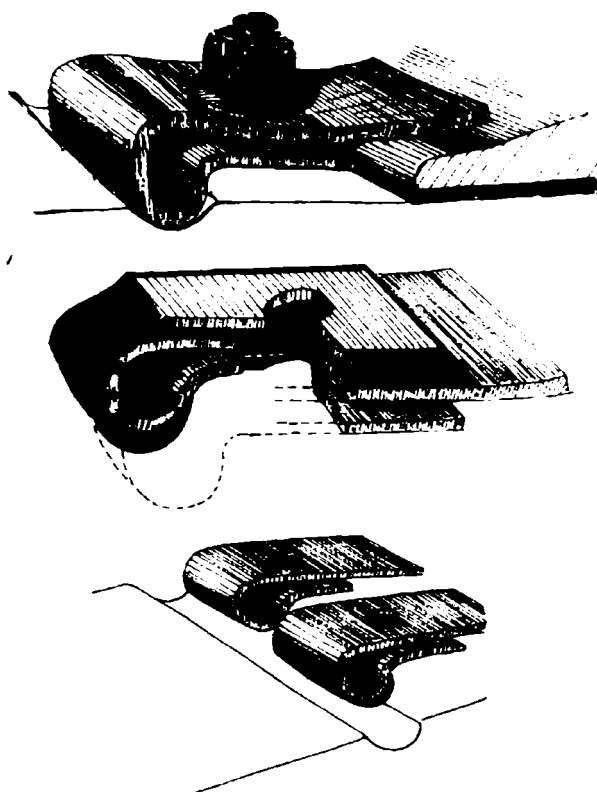


Fig. 4.22. Prindere cu clemă elastică RN.

La CFR a fost utilizată prinderea cu clemă elastică tip E2 (respectiv E5), prezentată în, fig. 4.23.

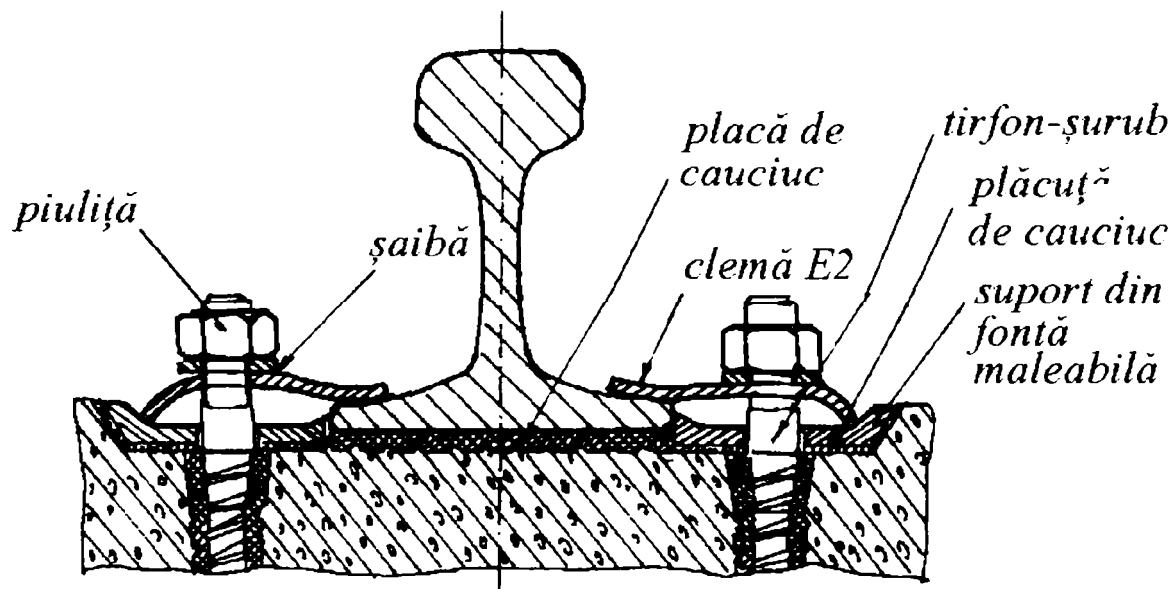
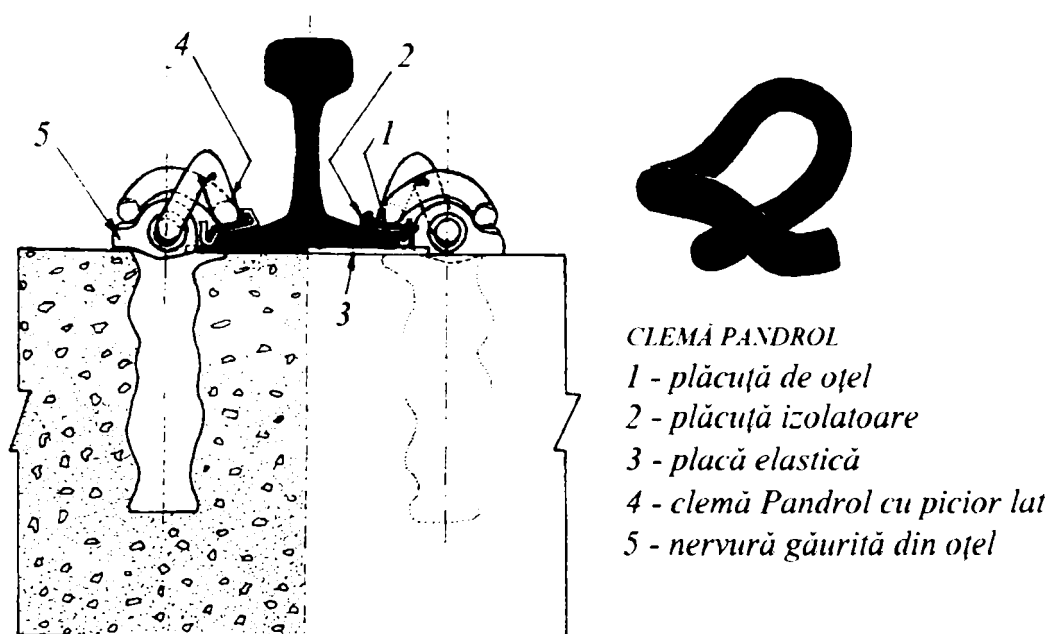


Fig. 4.23. Prinderea E2.

Prinderile cu cleme elastice au avantajul că pot fi ușor verificate și sunt relativ simple.

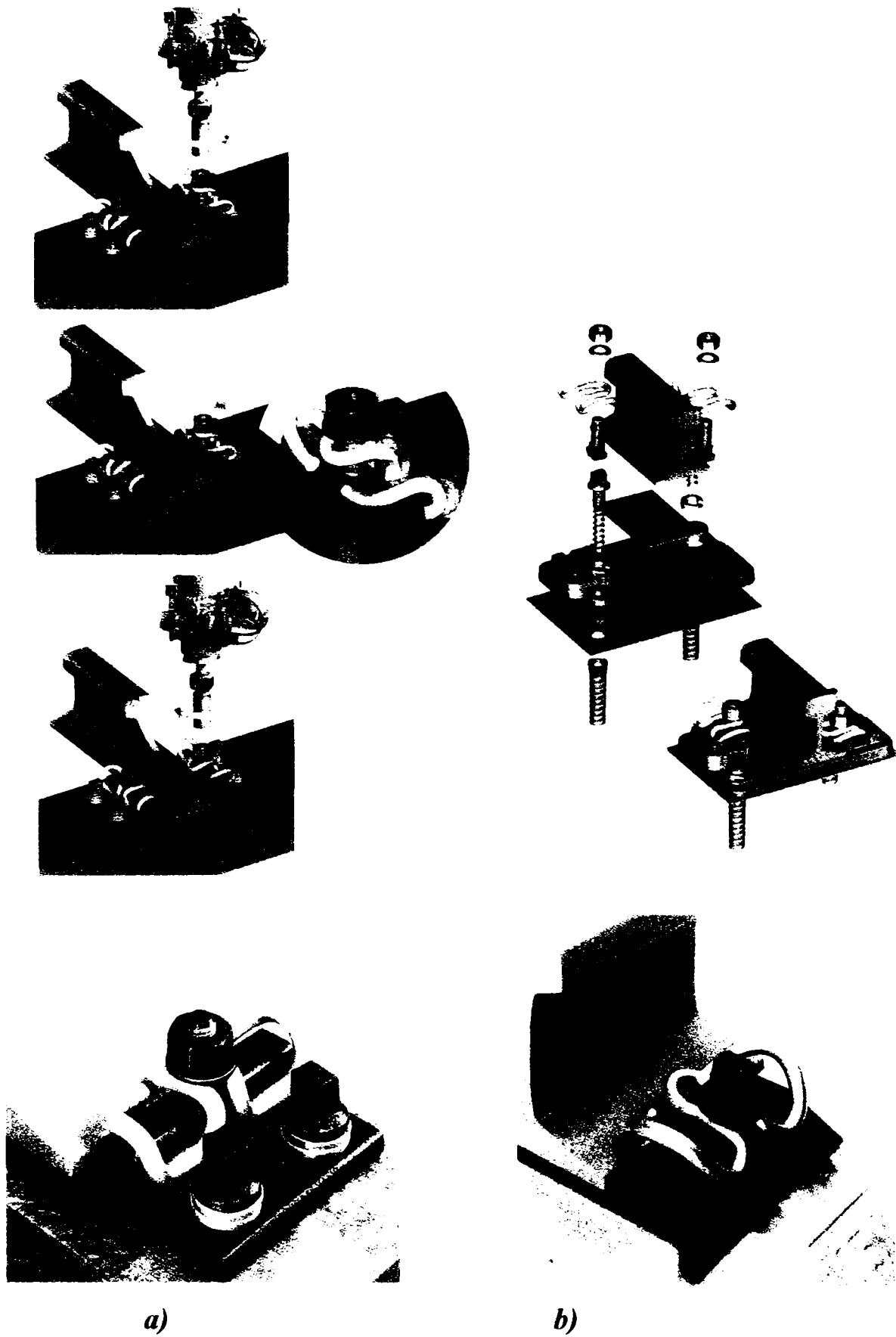
Tendința de simplificare a prinderii – ceea ce reclamă oțeluri de calitate superioară și traverse din beton fără abateri la dimensiuni și la calitatea betonului – a dus la realizarea *prinderilor cu agrafe elastice*. Un asemenea sistem de prindere (denumit E1) a fost experimentat la CFR în anii '70. La căile ferate suedeze se folosește o prindere originală denumită FIST. O prindere cu agrafe elastice foarte răspândită este prinderea PANDROL (fig. 4.24).



**Fig. 4.24.** Prinderea PANDROL.

Prinderile cu agrafe elastice tip SKL sunt cele mai răspândite. În fig. 4.25.a. este prezentată prinderea SKL 12, utilizată și la CFR, ca o soluție de tranziție (agrafa elastică SKL 12 și șaiba corespunzătoare înlocuiesc cleștele tip 49 și inelul resort corespunzător).

În prezent, la reabilitarea liniilor de cale ferată ale CN CFR se utilizează prinderea SKL 12 sau SKL 14 (fără placă metalică suport; fig. 4.25.b) respectiv prinderea PANDROL.



a)

b)

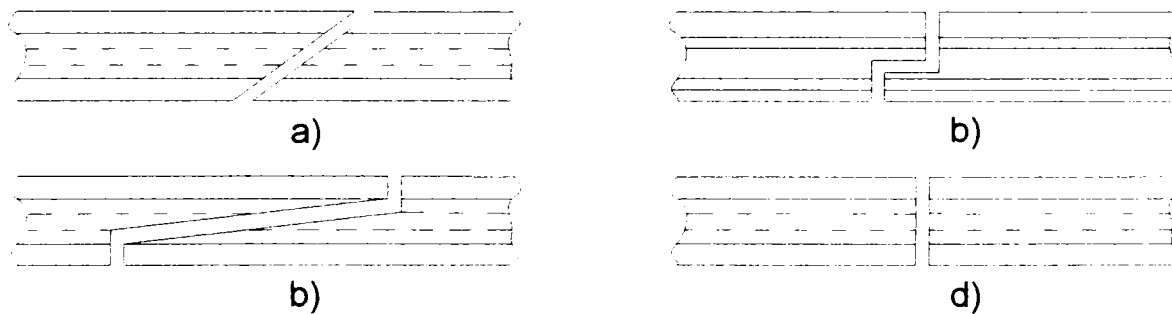
Fig. 4.25. Prinderea SKL 12 (a) și 14 (b).

## 2.2. Joantele de cale ferată

Joantele sunt dispozitive constructive prin care se realizează legarea capetelor de șine între ele. Joanta trebuie să asigure continuitatea suprafețelor de rulare și a celor laterale active ale celor două șine.

Clasificarea joantelor se poate face după mai multe criterii. Astfel, după modul de racordare a șinelor la capete au existat următoarele soluții:

- capete de șină tăiate oblic în plan (fig. 4.26.a.);
- capete suprapuse pe verticală (fig. 4.26.b.);
- capete îmbinate în plan (fig. 4.26.c.);
- capete secționate normal pe axa longitudinală (fig. 4.26.d.), care este cea mai răspândită soluție.



**Fig. 4.26.** Racordarea șinelor la capete.

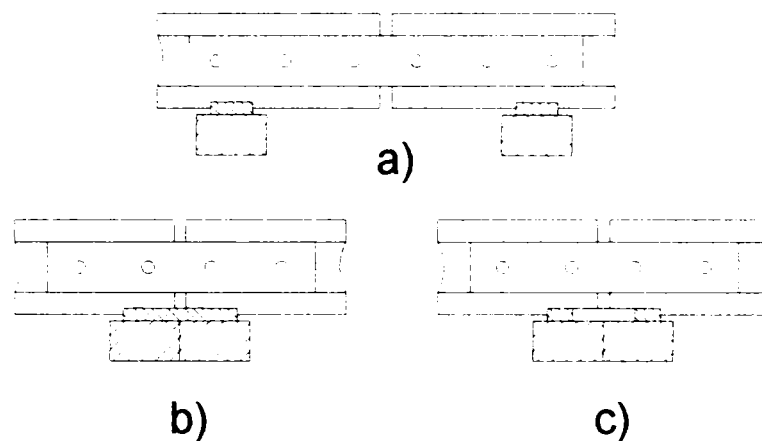
Din punct de vedere al modului de rezemare a celor două capete de șină se pot deosebi:

- joante elastice (suspendate), unde rezemarea capetelor de șină se face pe două traverse distanțate; șocurile sunt micșorate, dar eclisele trebuie să fie puternice pentru a prelua momentul încovoietor (fig. 4.27.a.);
- joante rigide (rezemate), unde capetele de șină reazemă pe o placă pod fără decupare, așezată pe două traverse de lemn, apropiate (fig. 4.27.b.);

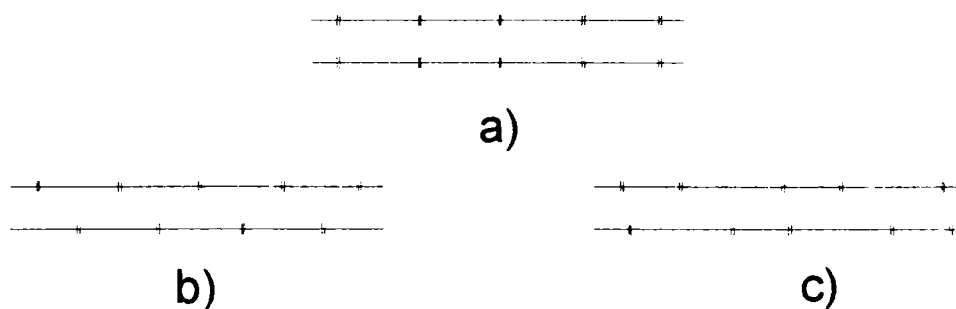
- joante semielastice (semirigide, semisuspendate, semirezemate), au o placă pod cu decupare sub capetele de șină (fig. 4.27.c.).

După poziția reciprocă a joantelor de pe cele două fire, se deosebesc:

- joante așezate la echer (fig. 4.28.a.);
- joante așezate la eșiecher (fig. 4.28.b.);
- joante așezate fără nici un sistem (fig. 4.28.c.).



**Fig. 4.27.** Rezemarea capetelor de șină.



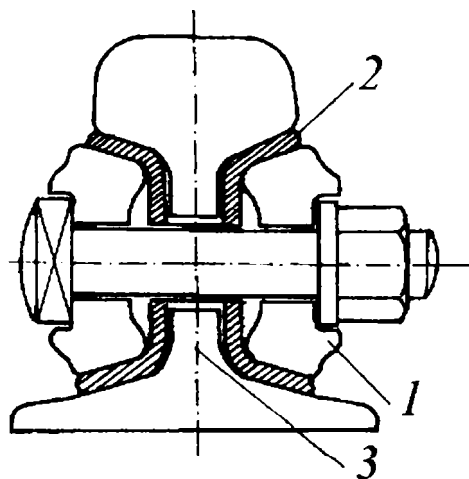
**Fig. 4.28.** Așezarea joantelor pe cele două fire.

Din punct de vedere a izolării electrice a celor două capete de șină joantele pot fi:

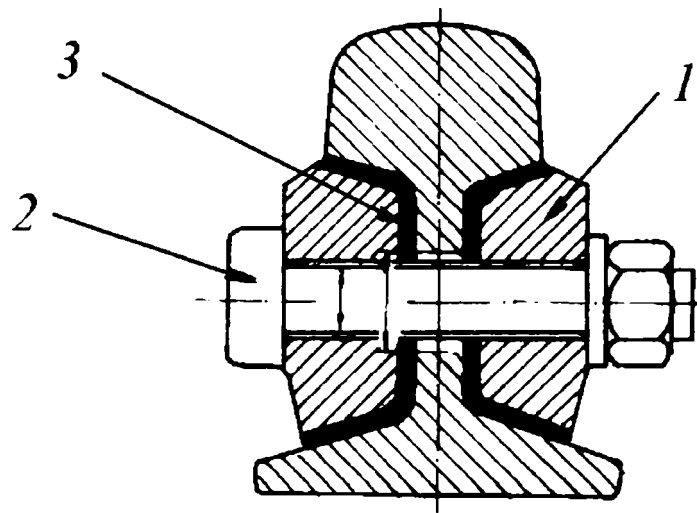
- joante obișnuite;
- joante izolante, folosite în cazul stațiilor centralizate și pe liniile înzestrate cu bloc de linie automat – B.L.A. Pentru realizarea joantelor izolante există diferite sisteme:



- joante izolante cu eclise de lemn (joante Weber sau joante cu eclise lignofol): eclisele din lignofol (material confecționat din lemn stratificat, adică un furnir de lemn impregnat cu materiale polimere așezat în pachete și supus la presiuni mari și temperaturi ridicate) sunt mult mai rezistente decât cele realizate din lemn masiv utilizate la joantele Weber;
- joante izolante cu eclise metalice tip Bănuța (fig. 4.29.); eclisele (1) sunt îmbrăcate pe jumătate cu material izolant (2) iar în găurile de șină, mărite corespunzător, se introduc inele izolante (3); cele două capete de șină reazemă pe o placă pod specială cu material izolant pe jumătatea lungimii ei peste care se așează două plăci simple; se utilizează pe unele linii de cale ferată tip 49;
- joante izolante lipite (J.I.L.) la care legătura între capetele de șină se realizează cu ajutorul unor eclise metalice lungi (1) prinse în 6 șuruburi orizontale (2); toate piesele metalice sunt lipite între ele cu rășini epoxidice (3); aceste joante izolante lipite (fig. 4.30.) se confecționează în întreprinderi specializate și se livrează sub formă de cupon de 12,50 m .... 15,00 m sau de alte lungimi.



*Fig. 4.29. Joantă tip Bănuța.*



*Fig. 4.30. Joantă izolantă lipită.*

După tipul capetelor de șină legate între ele deosebim:

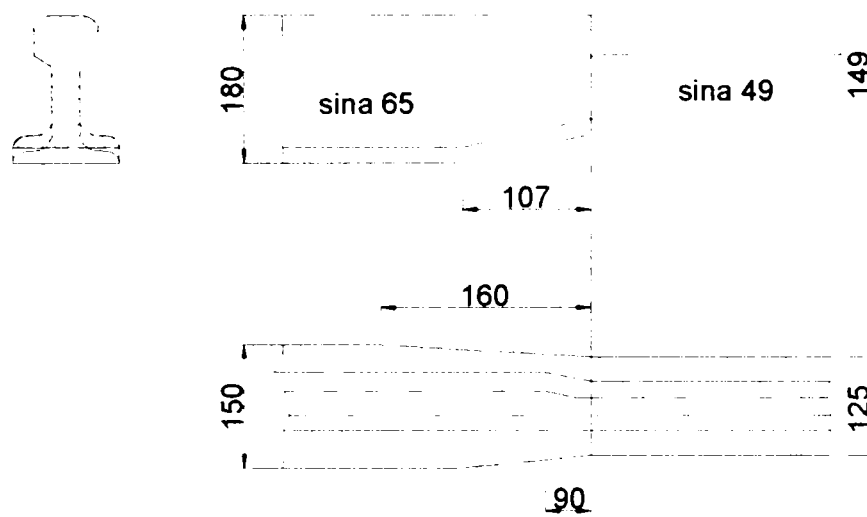
- joante obișnuite;
- joante de racordare, care leagă capetele de șină de tip diferit.

Joantele de racordare se realizează cu:

- eclise de racordare;
- cupoane de tranziție.

Eclisele de racordare se obțin prin prelucrarea mecanică (foraje și/sau rabotare) a eclisei de tip mai mare, astfel încât să se realizeze continuitatea suprafeței de rulare. Din cauza comportării defectuoase în exploatare, eclisele de racordare se utilizează numai când tipurile de șină diferă cu mai puțin de 10 kg/m între ele sau (cu real succes) când șinele sunt de același tip, dar cu uzuri diferite.

Cupoanele de tranziție (cupoanele de racordare) leagă două șine de tip diferit. Se realizează prin sudarea cap la cap a două cupoane de șine de tipurile celor din cale. Cuponul de tranziție (fig. 4.31) se leagă în cale în mod obișnuit.



*Fig. 4.31. Cupon de tranziție.*

Joanta, pentru a funcționa bine, trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

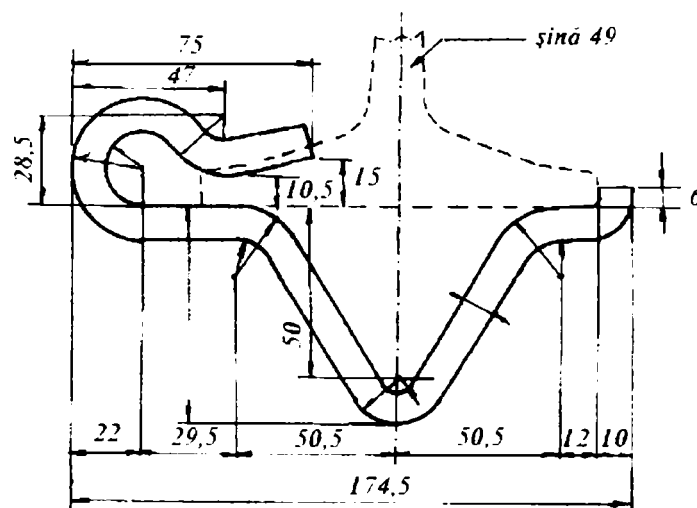
- să asigure continuitatea suprafețelor de rulare;
- să asigure continuitatea suprafețelor laterale active;
- să permită deplasarea capetelor de șină și formarea rostului de dilatație maxim, fără deformarea tijei șurubului orizontal;
- să asigure circulația liniștită, deci să nu se deformeze prea mult;
- să asigure rezemarea corectă a umerilor eclisei;
- să prevină contactul între eclisă și inima șinei.

### **2.3. Dispozitive contra fugirii șinelor**

Forțele orizontale și verticale transmise de materialul rulant căii și forțele de întindere sau de compresiune date de variația temperaturii șinei produc deplasarea elementelor care alcătuiesc calea atât ca ansamblu cât și relativ unele față de altele. Aceste deplasări trebuie ținute între anumite limite pentru a nu se periclita

condițiile de confort și siguranța circulației impuse. Printre deplasările care apar frecvent se numără aceea a șinelor față de traverse numită și „fugirea șinelor”.

Pentru reducerea deplasării șinelor în lungul liniei în trecut au fost utilizate dispozitive contra fugirii șinelor, cum ar fi: cleme Oetl și eclise intermediare, în ultima perioadă preferându-se dispozitivele elastice contra fugirii șinelor (fig. 4.32).



**Fig. 4.32.** Dispozitiv elastic contra fugirii șinelor.

Clemele Oetl se mai găsesc pe unele linii secundare, dar se utilizează și la întreținerea sau repararea liniilor. Eclisele intermediare mai există pe unele linii slab circulate având suprastructura tip 40.

Dispozitivele elastice contra fugirii șinelor se execută din oțel arc prin forjare în matriță. Se montează pe talpa șinei prin batere imediat lângă traversă. Astfel, sporește rezistența la deplasarea în lung a șinelor deoarece frecarea dată de prinderea șinei de traverse este înlocuită cu rezistența dată de prisma căii la deplasarea în lung a cadrului șine-traverse.

Zonele în care se folosesc asemenea dispozitive sunt:

- zone cu declivități mari;
- sectoare de linie cu circulație preponderentă într-o anumită direcție;
- zonele de reparație a căii fără joante.

## 2.4. Dispozitive contra deripării

Dispozitivele contra deripării sporesc rezistența  $q$  opusă de prisma căii la deplasarea laterală (deriparea) cadrului șine-traverse. Se folosesc (destul de rar) în curbele cu raze mici, în special la calea fără joante. În fig. 4.33. este prezentat un dispozitiv contra deripării.

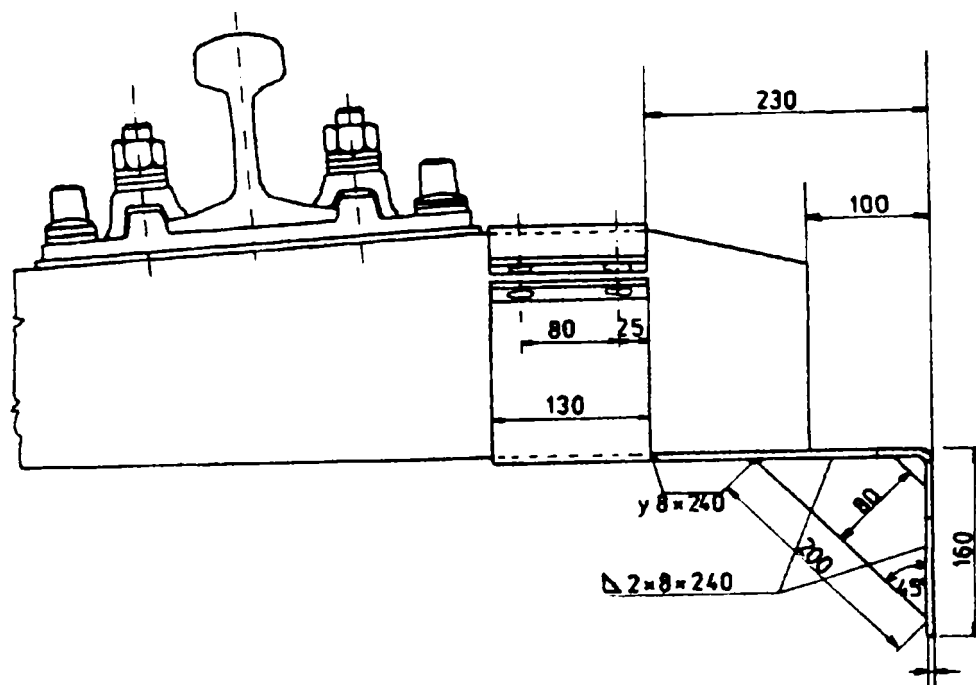


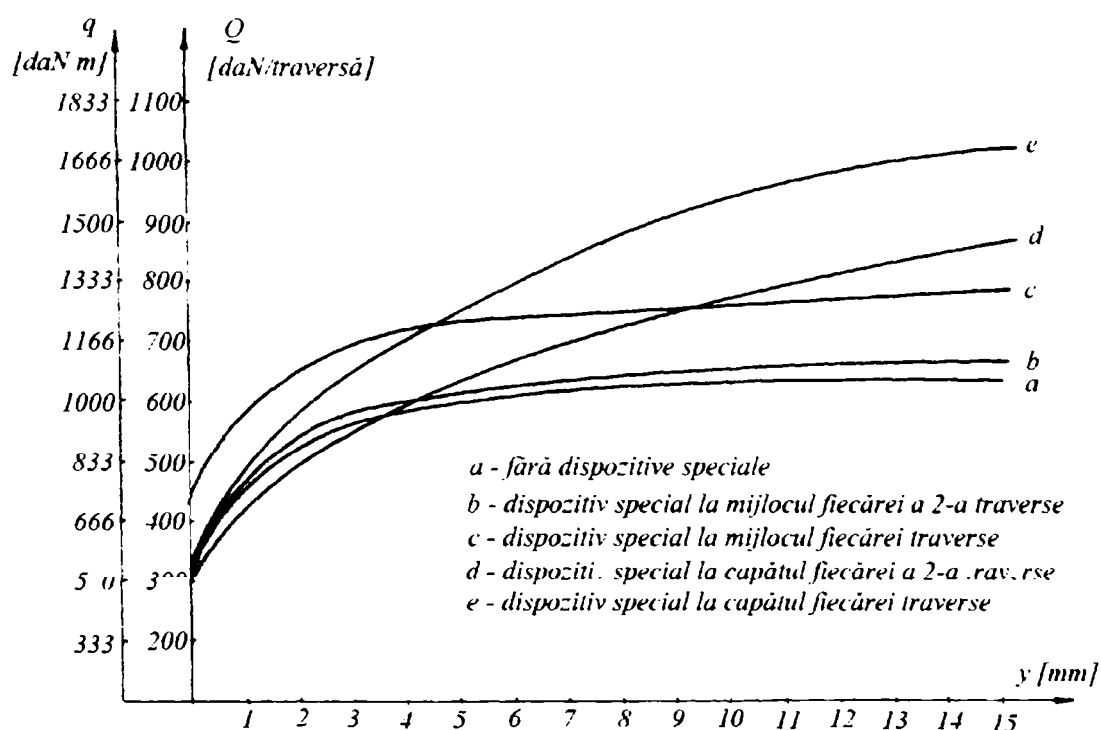
Fig. 4.33. Dispozitiv contra deripării.

Sporul de rezistență obținut este în funcție de desimea dispozitivelor utilizate (tabelul 4.6.).

Tabelul 4.6.

Modul de utilizare a dispozitivelor speciale (aripi)	Sporul de rezistență $q$ [%]	
	Traverse din beton	Traverse din lemn
Fără aripi	0	0
Cu aripi din 3 în 3 traverse	20	23
Cu aripi din 2 în 2 traverse	40	37
Cu aripi la fiecare traversă	90	100

În fig. 4.34. sunt prezentate rezultatele unor măsurători efectuate pentru determinarea rezistenței laterale ( $q$  sau  $Q$ ) în cadrul utilizării aripilor contra deripării.



**Fig. 4.34.** Variația rezistenței  $q$  în cazul utilizării aripilor.

### 3. Traverse

Traversele de cale ferată au rolul principal de a prelua sarcinile primite de șine de la materialul rulant și de a le transmite, diminuate corespunzător, prismeii căii. Traversele mai asigură (împreună cu elementele de prindere) ecartamentul căii și, prin rezemarea și încastrarea lor în prisma căii, stabilitatea căii în plan orizontal și în plan vertical.

Pentru aceasta traversele trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- să fie suficient de rezistente (în special, la încovoiere, dar și la strivire);

- să fie elastică, pentru a amortiza șocurile;
- să permită prinderi sigure și ușor de executat;
- să fie ușor de prelucrat;
- să permită realizarea de suprastructuri speciale (poduri, treceri la nivel, aparate de cale, curbe cu contrașine, etc.);
- să fie ușor de manipulat;
- să nu se distrugă în cazul deraierilor;
- să opună rezistențe mari la deplasarea căii (aderență mare cu prisma căii);
- să aibă rezistență electrică mare (pentru izolarea electrică a șinelor);
- să reziste la acțiunea agenților atmosferici (apă, temperatură, etc.);
- să fie cât mai ieftine.

Traversele pot fi realizate din lemn, oțel sau beton (în această ordine cronologică au fost utilizate la construcția căilor ferate). Azi, majoritatea administrațiilor feroviare optează pentru utilizarea traverselor din beton precomprimat.

#### **4.1. Traverse din lemn**

Traversele din lemn îndeplinesc majoritatea condițiilor enumerate. Se confecționează de obicei din lemn de esență tare (stejar, fag, gorun, gârniță, cer, etc.) și mai rar din lemn de esență moale (brad, molid, pin, plop, salcâm, ulm, etc.) sau din lemn de esențe speciale, exotice (gabonul, laricea, etc.).

După locul lor de utilizare, traversele din lemn pot fi:

- traverse normale (la linii cu ecartament normal);
- traverse pentru căi ferate cu ecartament îngust, respectiv ecartament larg;
- traverse pentru poduri;

- traverse speciale, pentru aparate de cale.

Traversele normale au secțiunea transversală tip A1, A2, B sau C (fig. 4.35.) și dimensiunile corespunzătoare prezentate în tabelul 4.7. în funcție de lungimea traversei ( $l_t$ ).

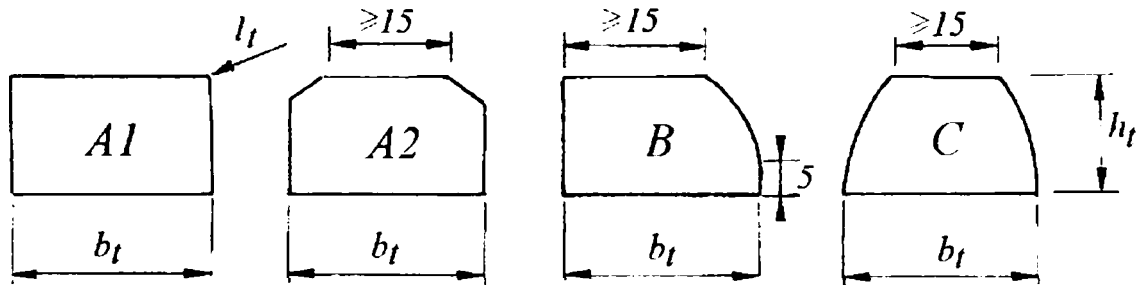


Fig. 4.35. Secțiune transversală prin traversele normale.

Tabelul 4.7.

Lungime traversă [cm]	A1		A2		B		C	
	$b_t$ [cm]	$h_t$ [cm]	$b_t$ [cm]	$h_t$ [cm]	$b_t$ [cm]	$h_t$ [cm]	$b_t$ [cm]	$h_t$ [cm]
260	26	16	26	16	26	16	26	16
250	25	15	25	15	25	15	25	15
240	21	14	21	14	21	14	21	14

Pentru căile ferate înguste se folosesc traverse din lemn de tip A2 având  $h_t = 12$  cm,  $b_t = 16$  cm,  $a = 12$  cm și  $l_t = 120; 130; 150$  sau  $180$  cm, în funcție de ecartament.

Traversele pentru poduri au secțiunea de tipul A1 și dimensiunile secțiunii transversale:  $24 \times 24$  cm,  $22 \times 22$  cm sau  $22 \times 24$  cm la lungimi  $l_t = 250 \dots 280$  cm.

Traversele speciale (pentru aparate de cale) pentru linii cu ecartament normal au secțiunea de tip A1 ( $26 \times 16$  cm) și lungimi de la 280 cm la 560 cm, din 10 în 10 cm.

Factorii care provoacă scoaterea din exploatare a traverselor din lemn sunt:



- putrezirea traverselor;
- fisurarea și crăparea traverselor;
- uzura mecanică a traverselor.

*Putrezirea traverselor* este provocată de acțiunea microorganismelor și ciupercilor, favorizată de umiditate și este combătută prin impregnare (tratarea lemnului cu substanțe antiseptice). O traversă din stejar neimpregnată are o durată de serviciu de maxim 12... 15 ani iar prin impregnare această durată se dublează. Substanțele antiseptice folosite sunt:

- substanțe chimice minerale cu clorură de zinc (  $ZnCl_2$  ) și clorură mercurică (  $HgCl_2$  ), etc., cu rezultate slabe în timp;
- substanțe organice ca *creozotul*, carbolineum, cuprizol sau alte uleiuri distilate din gudroanele din cărbune și diluate în diferite produse petroliere.

Cea mai folosită substanță antiseptică este creozotul. Impregnarea se realizează în uzine de impregnare.

*Fisurarea și crăparea traverselor* se produce datorită contracției prin acțiunea de despicare provocată de elementele de fixare ale șinelor (tirfoane, crampoane), prin acțiunea forțelor orizontale transmise prin elementele de fixare, prin acțiuni mecanice de solicitare în timp, oboseală, etc.

Fisurarea și crăparea traverselor poate fi prevenită prin alegerea corectă a esenței lemnului, prin fasonarea traversei “verzi” în perioada repausului vegetativ, prin realizarea umidității optime (< 18...20 %) înainte de impregnare, prin impregnarea corect realizată, utilizarea materialului filetat pentru fixarea șinelor, așezarea traverselor pe un strat de piatră spartă uniform și bine compactat, evacuarea bună a apelor din prisma căii, etc.

## 4.2. Traverse din beton

Prima traversă din beton (armat) a fost brevetată de inginerul francez Monier, în 1884, dar abundența și costul redus al traverselor de lemn a întârziat utilizarea acesteia. Primele încercări experimentale de folosire a traverselor din beton au fost efectuate în 1890 în Italia (țară săracă în lemn). Azi, utilizarea traverselor din beton este generalizată în toată lumea. Dacă la început traversele de beton au fost armate obișnuit, astăzi sunt realizate din beton precomprimat deoarece prezintă următoarele avantaje față de cele din beton armat:

- rezistență superioară;
- dimensiuni mai reduse;
- consum de oțel redus;
- greutate mai mică;
- durată de serviciu mai mare (minim 50 de ani).

Clasificarea traverselor din beton se poate face după mai multe criterii:

- după importanța liniei de cale ferată:
  - traverse din beton pentru linii magistrale și principale;
  - traverse din beton pentru linii secundare, industriale, de interes local;
- după ecartament:
  - normal;
  - îngust;
  - larg;
- după modalitatea de alcătuire a suprastructurii:
  - traverse;
  - longrine;

- plăci;
- după sistemul de rezemare a traversei:
  - monobloc;
  - bibloc.

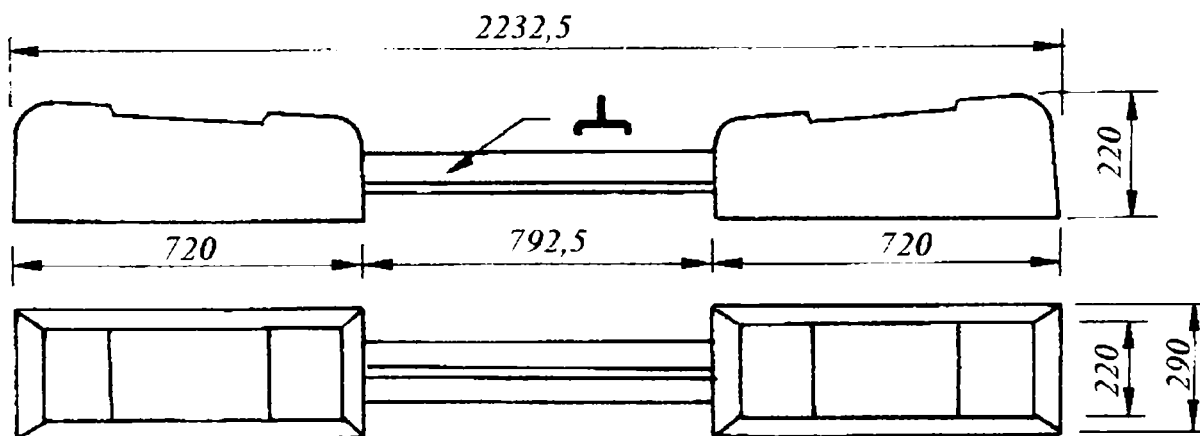
Există tipuri de traverse din beton speciale pentru poduri, aparate de cale, curbe cu contrașine, etc

Traversele din beton pot fi monobloc (fig. 4.37) sau bibloc (fig. 4.36).

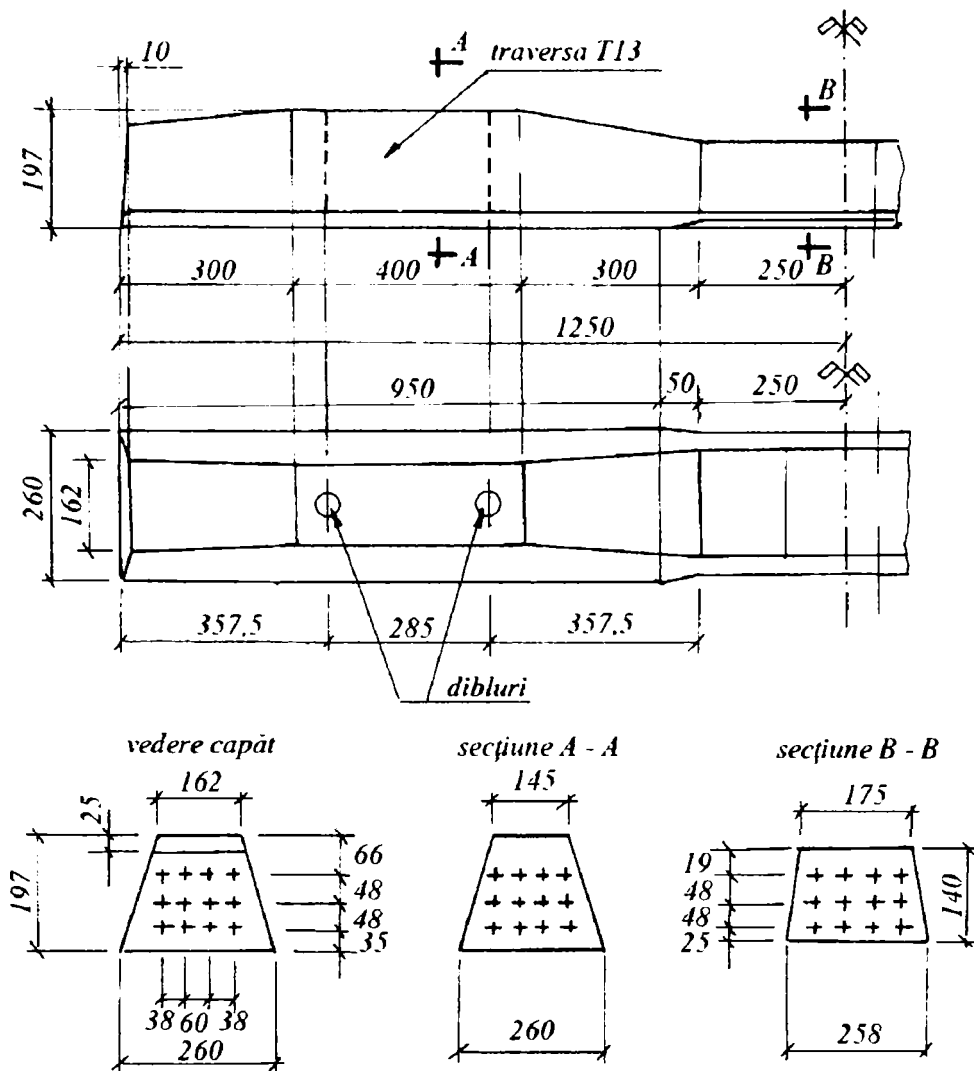
Exemplificând pentru traversa de tip T13, utilizată la suprastructuri tip 49 și prezentată în fig. 4.37, pentru realizarea acesteia se folosesc următoarele materiale:

- beton: B600;
- armătură: SBPI, 5,20 kg / buc. din corzi  $12 \times 3\phi 3$  mm.

Greutatea cadrului șină-traverse pe traverse din beton sporește considerabil față de cea corespunzătoare traverselor din lemn (o traversă din beton precomprimat are circa 220...270 kg, față de 80...90 kg pentru o traversă normală din lemn). Astfel, stabilitatea liniei de cale ferată sporește mult și permite realizarea și exploatarea optimă a căii fără joante.



**Fig. 4.36.** Traversă din beton bibloc.

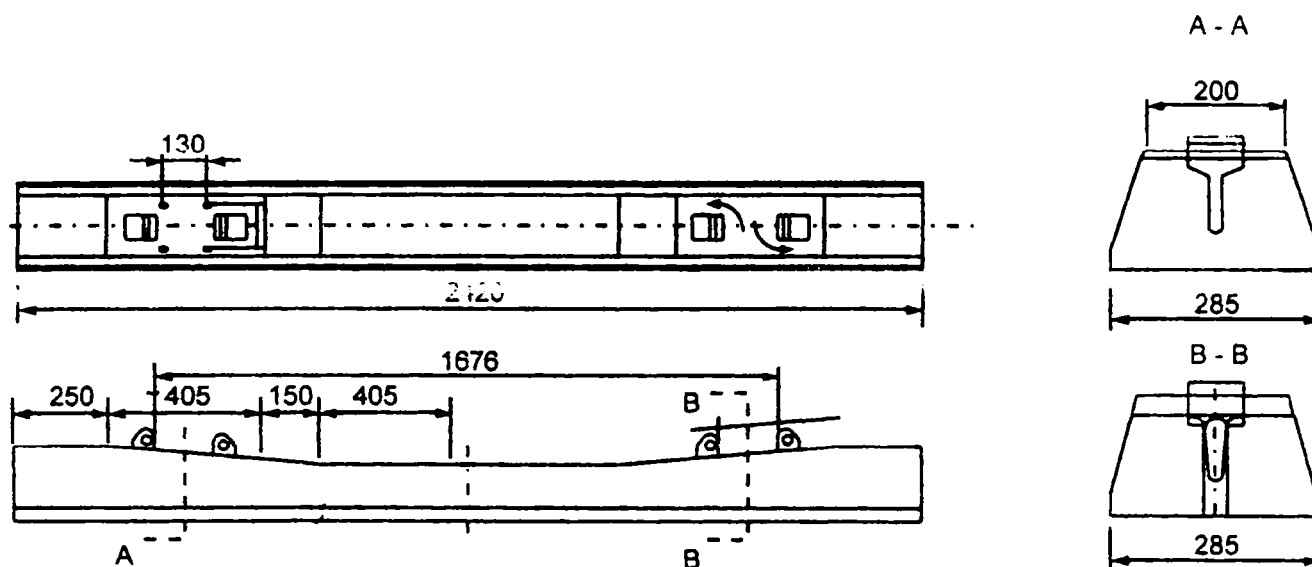


**Fig. 4.37.** Traversă din beton monobloc tip T13.

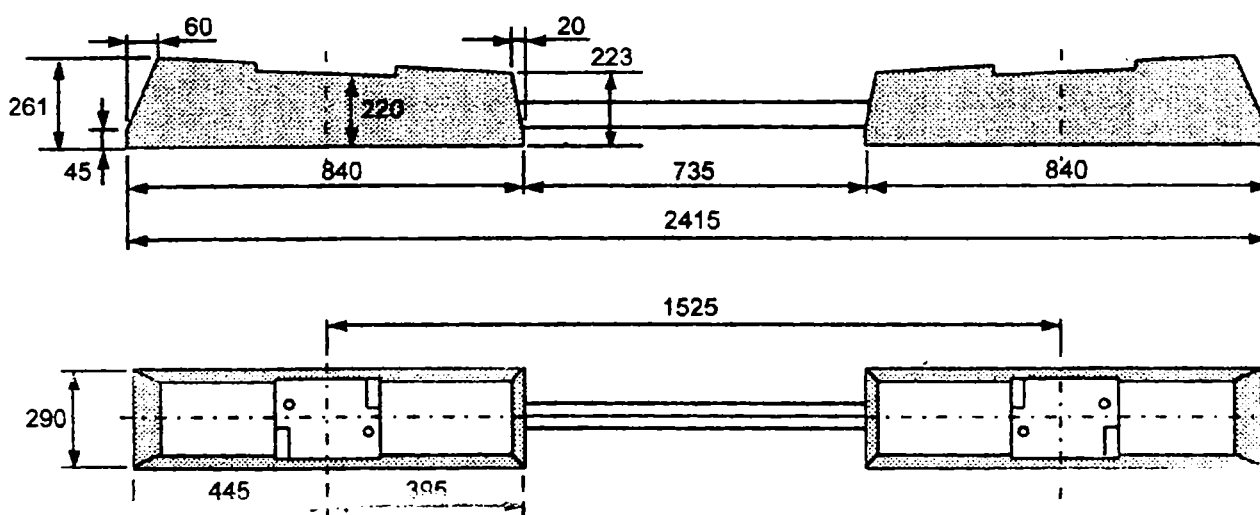
Volumul unei traverse T13 este de  $0,090 \text{ m}^3$  iar masa este de 225 kg.

Din experiența administrațiilor feroviare rezultă că nu se poate aștepta dezvoltarea spectaculoasă a traverselor din beton clasice (monobloc sau bibloc). Cercetările efectuate în anii 70 au dus la îmbunătățirea traverselor din beton pentru a diminua frecvența și mărimea fisurilor și crăpăturilor care apar în zonele de rezemare ale șinei respectiv pentru a ușura activitatea de refacții de linii ferate cu grinzi (macarale) lansatoare prin micșorarea lungimii și greutateii traverselor. Au fost realizate astfel traversele tip F 40 în Anglia (figura 4.38).

Administrația feroviară franceză a optat pentru traversa bibloc. Printre cele mai moderne traverse bibloc apare traversa U 41 (figura 4.39).



*Fig. 4.38. Traversa F 40*



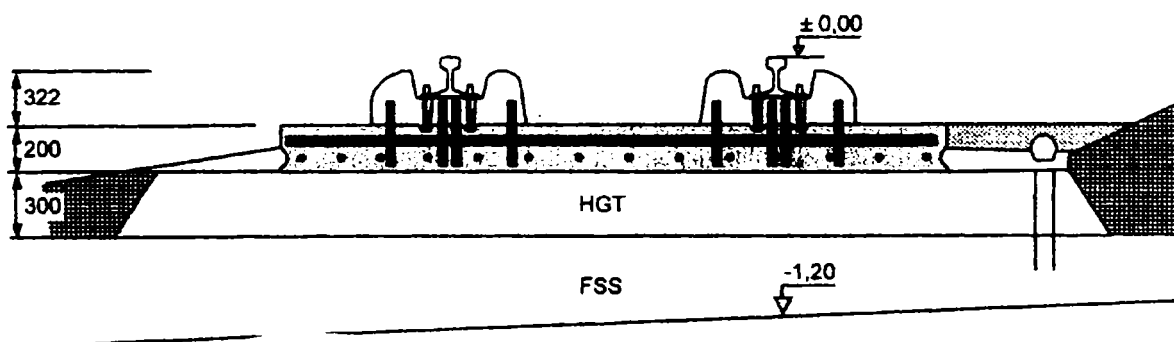
*Fig. 4.39. Traversa U 41*

Administrația feroviară germană preferă traversele monobloc. Una din traversele din beton moderne germane este traversa B 70, utilizată în multe țări, cu armătură netedă preîntinsă ( $8 \phi 6,9$ ) sau postîntinsă ( $4 \phi 9,7$ ;  $4 \phi 10$  sau  $4 \phi 12$ ).

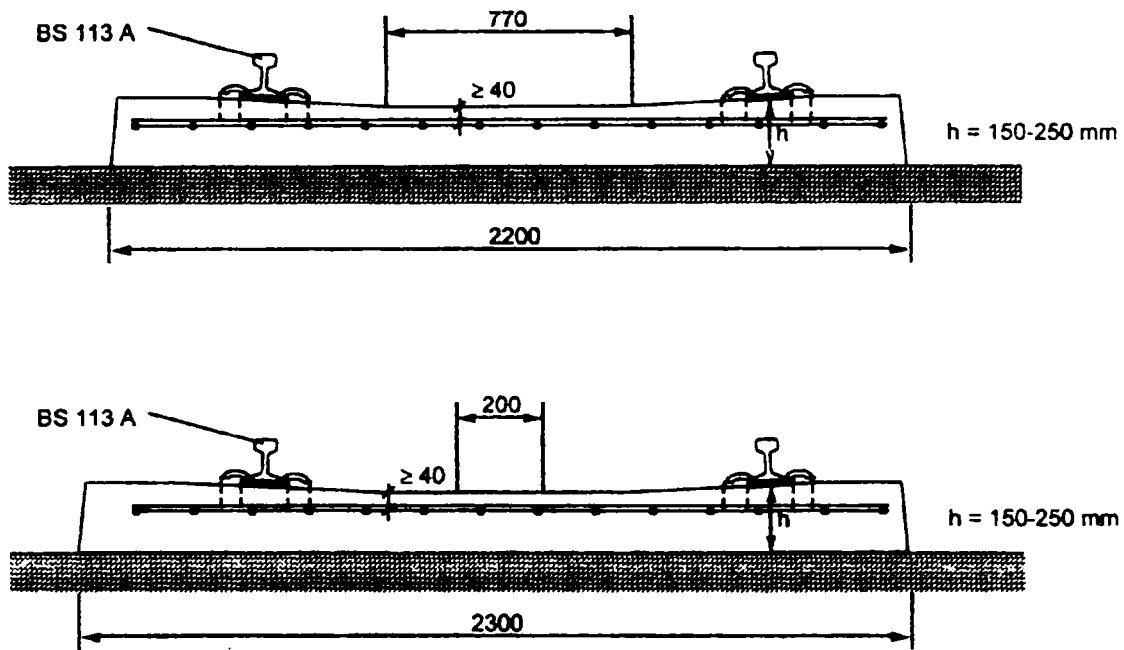
În prezent activitatea de cercetare - dezvoltare nu mai este axată pe elementele izolate ale suprastructurii feroviare ci pe întregul sistem șine - traverse - material mărunț - prisma căii. În centrul transporturilor feroviare se află trenurile de mare viteză (TGV, IC, etc.) care impun căii condiții de calitate superioare. Calea trebuie să fie cât mai rezistentă, cât mai sigură, geometria căii să nu se altereze în exploatare, condițiile de rulare să fie optime, vibrațiile să fie amortizate, necesarul lucrărilor de întreținere (implicit și costul lor) să fie minim. Pentru a satisface condițiile de calitate prezentate au fost realizate linii ferate pe pat rigid, în special în Anglia și Germania.

Sunt cunoscute trei tipuri de linii ferate pe pat rigid:

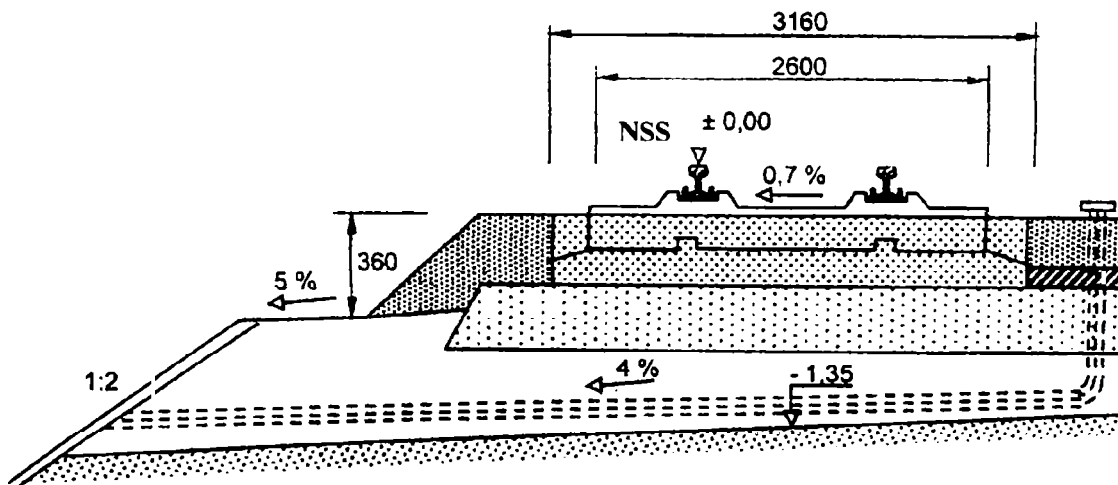
- rezemare în puncte pe o placă de beton (de exemplu sistemul german Hochtief / Schreck – Miever, care reprezintă varianta îmbunătățită a sistemului Rheda, figura 4.40, sau sistemul englez PACT, figura 4.41);
- traverse sau blocheți din beton pe placă suport din beton de ciment sau beton asfaltic (de exemplu sistemul german, figura 4.42);
- plăci din beton sau grile din beton prefabricate utilizate în Japonia pe liniile de mare viteză Shinkansen sau în Italia pe linia Udine – Tarvisio – Gemona – Pontebba.



*Fig. 4.40. Sistemul Hochtief / Schreck – Miever*



*Fig. 4.41. Sistemul PACT*

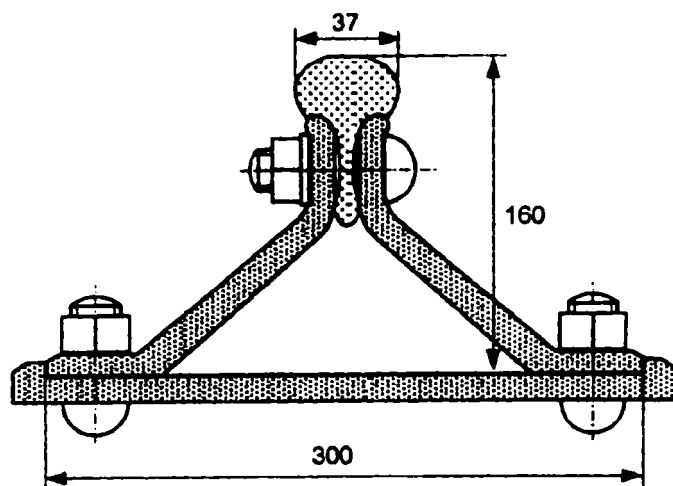


*Fig. 4.42. Sistemul Rheda*

### 4.3. Traverse metalice

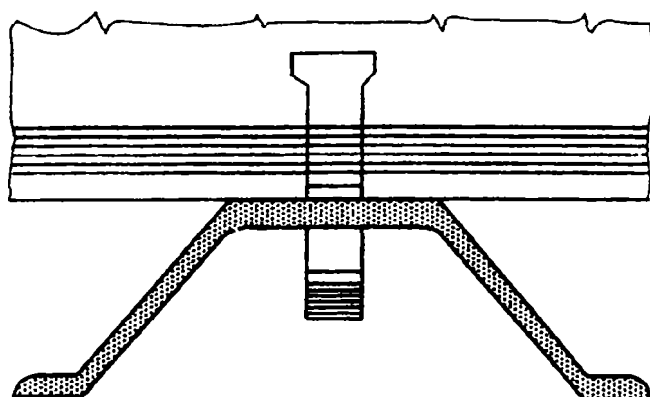
Traversele metalice au apărut încă din secolul al XIX-lea, dar utilizarea lor nu s-a generalizat. În cantități mai mari pot fi întâlnite în Anglia, Germania, Elveția, Grecia, etc.

Pe actuala rețea feroviară română primele traverse metalice (tip Serres - Battig) au fost introduse pe liniile Timișoara – Orșova și Oravița – Anina (fig. 4.43) începând cu anul 1878.



*Fig. 4.43. Traversa metalică tip Serres - Battig*

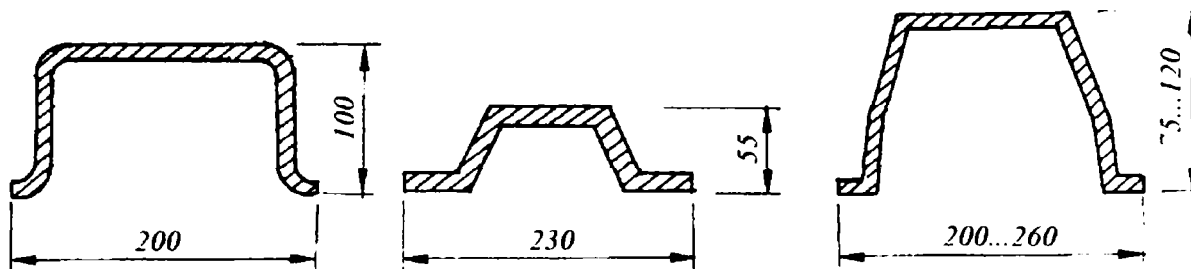
În perioada 1882... 1885 pe linia Simeria – Petroșani o parte din traversele din lemn au fost înlocuite cu traverse metalice tip Vautherin (fig. 4.44).



*Fig. 4.44. Traversa metalică tip Vautherin*

Traversele metalice se execută din tablă de oțel de 7...13 mm grosime, fasonată, presată sau laminată în forme speciale, de albie (formă de U) sau de cutie, așezate cu partea deschisă în jos (fig. 4.45.).





*Fig. 4.45. Traverse metalice. Tipuri de secțiuni.*

Traversele metalice au o serie de avantaje:

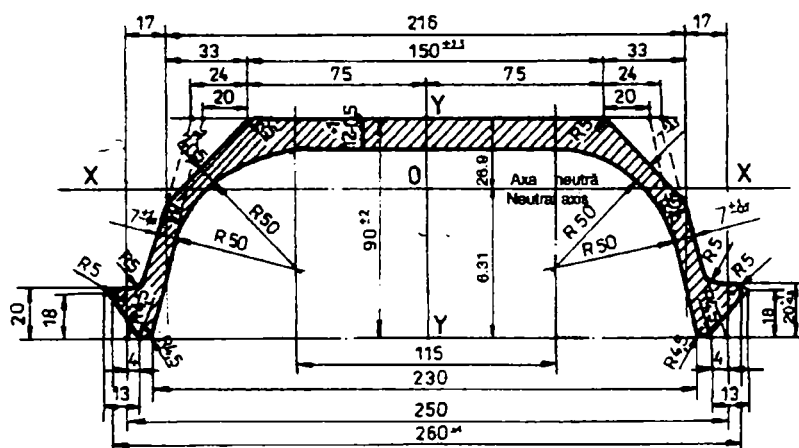
- greutate mică în raport cu traversele din beton;
- sunt foarte rezistente;
- au durabilitate mai mare decât traversele din lemn și din beton;
- prezintă rezistență mare la deplasări longitudinale și transversale;
- necesită o prismă a căii cu dimensiuni reduse;
- confecționarea lor este ușoară;
- rezistă foarte bine la solicitări, la foc, la paraziți vegetali;
- traversele scoase din uz pot fi ușor reciclate, etc.

Traversele metalice au și dezavantaje:

- sunt mai rigide;
- operațiile de burare sunt dificile;
- prinderea șinei de traversă se uzează mai repede;
- produc vibrații care uzează materialul rulant;
- circulația se face cu mai mult zgomot;
- izolarea electrică este foarte costisitoare;
- sunt mai scumpe decât cele din beton sau din lemn.

Din cauza dezavantajelor enumerate utilizarea traverselor metalice se face mai rar.

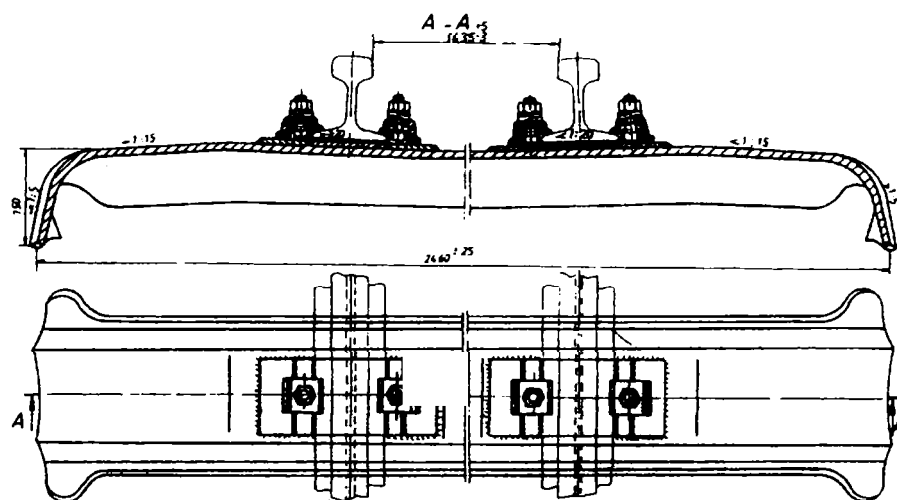
În România, APCAROM S.A. Buzău execută traverse metalice pentru calea ferată (figura 4.47), atât pentru linia curentă cât și pentru aparatele de cale, pentru șine tip 40, S 49, 60 UIC, R 65, etc. Aceste traverse sunt executate din profil laminat verificat tip UIC 28 kg/m. Traversele se execută în condițiile tehnice prevăzute de fișele UIC 865-1.0 și 865-2.0. Materialul utilizat la execuția traverselor metalice este OL 42,3 K sau OL 52.2 K – STAS 500/2 -1980. Traversele se obțin din profilul laminat (figurile 4.46 ; 4.48 ; 4.49) prin operații de debitare la rece, polizare, găurire, presare în matriță, sudare iar protecția se face cu un strat de gudron.



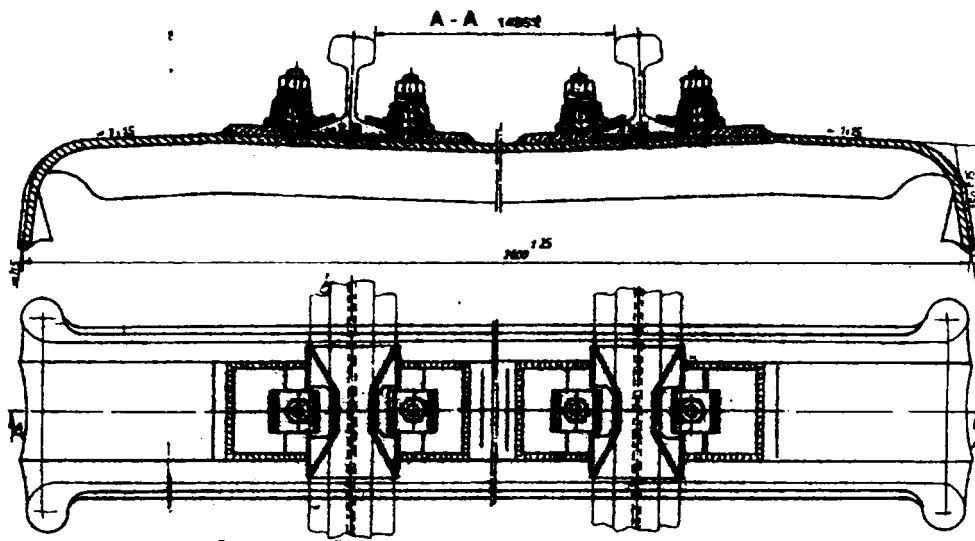
**Fig. 4.46.** Traversă metalică. Secțiune transversală



**Fig. 4.47.** Traverse metalice.

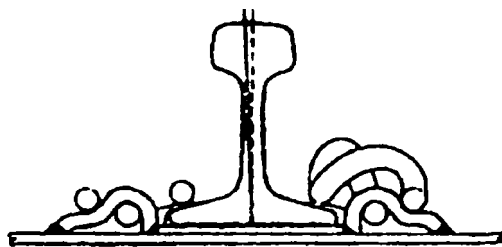


**Fig. 4.48.** Traversă metalică tip 49 neizolată electric

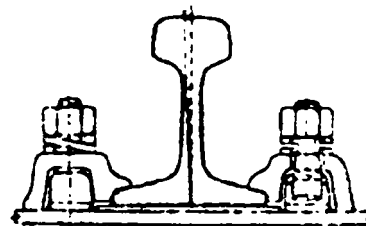


**Fig. 4.49.** Traversă metalică tip 49 izolată electric

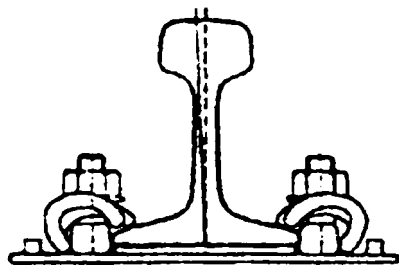
În figura 4.50 sunt prezentate câteva tipuri de prinderi actuale ale șinei pe traverse metalice, utilizate la unele administrații feroviare (DB, BR, SNCF etc).



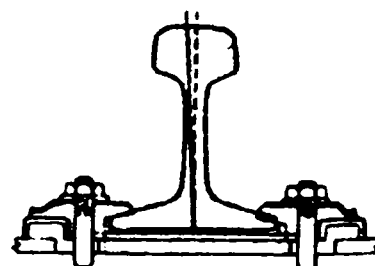
**Pandrol PR401A fastening**



**Aek fastenings**



**Vossloh SK1 12 fastening**



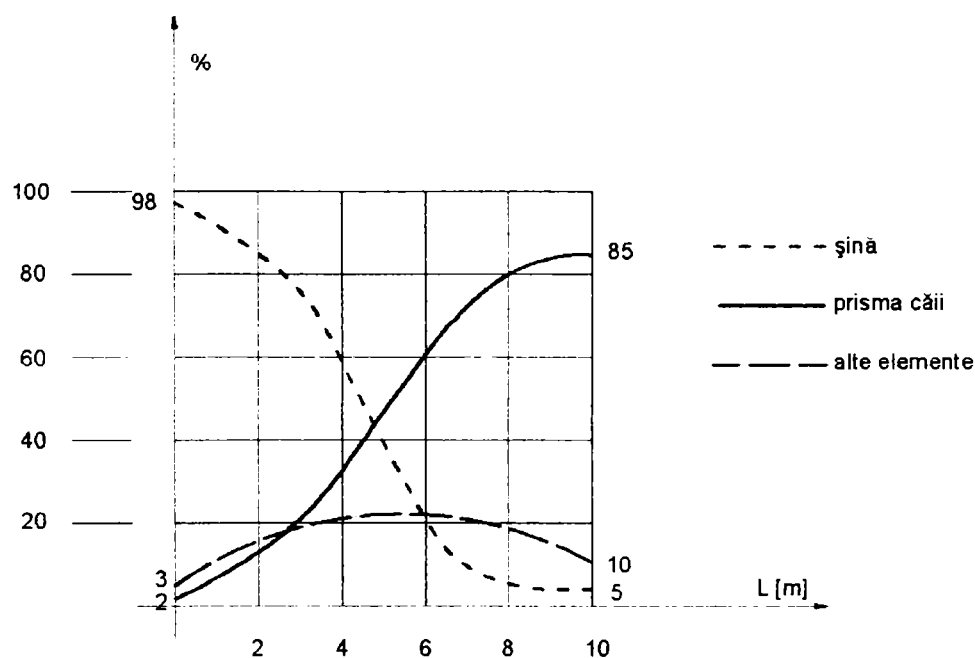
**'T' bolt Nabla fastening**

**Fig. 4.50.** Prinderea șinei pe traverse metalice

## 4. Prisma căii

Traversele sunt așezate pe un strat de piatră spartă și apoi înglobate în prisma căii (prisma de piatră spartă, prisma de balastare). Stratul de piatră spartă are următoarele roluri:

- susținerea traverselor;
- preluarea sarcinilor verticale statice și dinamice de la traverse și transmiterea acestora diminuate corespunzător infrastructurii liniei de cale ferată;
- asigurarea stabilității căii în plan transversal și profil longitudinal;
- amortizarea șocurilor, a vibrațiilor, a efectelor dinamice transmise de materialul rulant;
- drenarea căii;
- micșorarea posibilității de îngheț a platformei căii;
- prevenirea deformațiilor rapide ale căii.



**Fig. 4.51.** Rolul prismeii căii în asigurarea stabilității cadrului șine-traverse la deripare.

Prisma căii are un rol important în asigurarea stabilității cadrului șine-traverse la deplasări laterale (deripări). Acest rol, în comparație cu cel al șinelor respectiv al materialului mărunț este ilustrat în fig. 4.51.

Se observă că la deripări lungi rolul prismeii căii este esențial în raport cu rolul celorlalte elemente iar la deripări scurte, rolul esențial în asigurarea stabilității revine șinelor.

Pentru a îndeplini rolurile menționate, materialul din care este realizată prisma căii trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- să fie rezistent la compresiune;
- să fie suficient de elastic;
- să aibă frecare interioară mare;
- să aibă coeficient de frecare cu traversele mare;
- să fie drenant;
- să se poată compacta și bura fără să se sfarme;
- să nu se altereze sub acțiunea agenților atmosferici;
- să nu favorizeze creșterea vegetației.

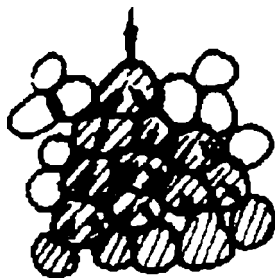
Materialul cel mai utilizat la realizarea prismeii căii este piatra spartă. Rar se utilizează și pietriș ciuruit, balast, criblură, nisip sau zgură de furnal.

Piatra spartă se obține prin spargerea (concasarea) unor roci eruptive (granit, bazalt, andezit, etc.), sedimentare (gresii, calcare, etc) sau metamorfice (micașisturi, gneisuri, cuarțite, etc.). Cea mai bună piatră spartă se obține din rocile eruptive, în special granit.

Dimensiunile optime ale fragmentelor de piatră spartă, stabilite teoretic și experimental, sunt cuprinse între 20 mm și 70 mm (25...63 mm). Forma fragmentelor trebuie să fie colțuroasă și poliedrică cu raportul dimensiunilor de 0,33/0,66/1,00, eventual 0,25/0,50/1,00.

Deformațiile stratului de piatră spartă sub talpa traversei sunt cauzate de încărcările transmise de materialul rulant prin intermediul traverselor și pot fi elastice și plastice (remanente). Deformațiile elastice se produc din următoarele cauze:

- scurtarea elastică a distanțelor dintre centrele fragmentelor care alcătuiesc stratul de piatră spartă;
- deformații elastice în zona de contact (fig. 4.52).



*Fig. 4.52. Deformarea elastică a stratului de piatră spartă.*

Deformațiile elastice sunt mai mari dacă fragmentele de piatră spartă au dimensiuni mai mari deoarece aceeași presiune se transmite la un număr mai mic de fragmente iar mărimea deformației elastice este direct proporțională cu mărimea presiunii.

Deformațiile remanente (plastice) au următoarele cauze:

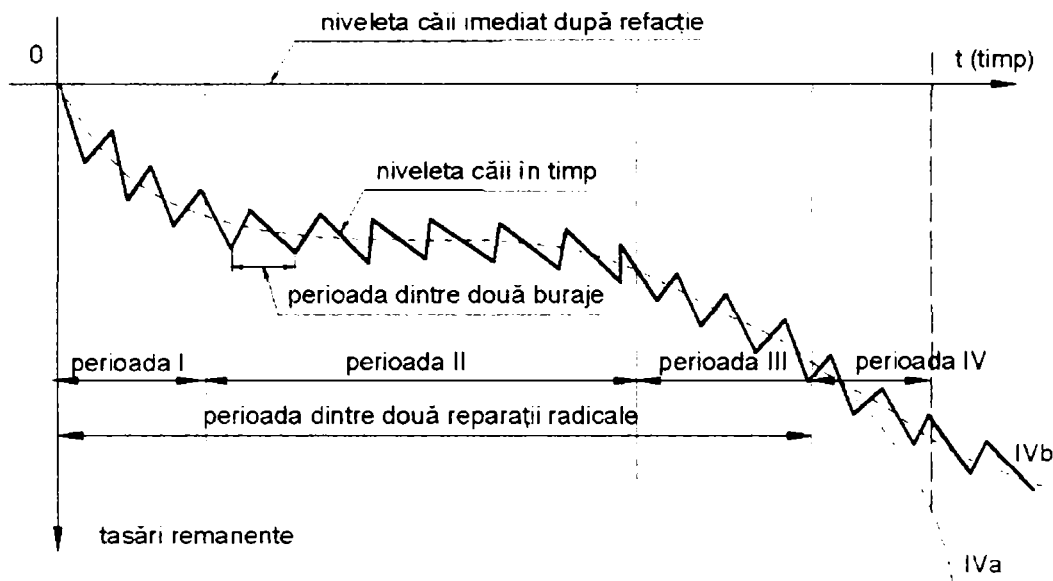
- reașezarea fragmentelor din cauza forțelor exterioare;
- deformația remanentă a fragmentelor, în special în punctele de contact;
- uzura, sfărâmarea, strivirea fragmentelor din cauza circulației sau a lucrărilor de întreținere (în special buraj);
- acțiunea agenților atmosferici (apă, vânt, variația temperaturii, etc.);
- impurificarea prismeii căii.

Factorii prezentați mai sus duc la:

- reducerea elasticității stratului de piatră spartă;

- colmatarea prismeii căii și reducerea proprietăților drenante.

În fig. 4.53. este prezentată evoluția deformației nivelului căii în timp.



**Fig. 4.53.** Evoluția niveleței căii în timp.

Se observă că, imediat după o reparație capitală a căii (perioada I) tasările au un caracter pronunțat. În perioada a II-a, tasările se stabilizează, rectificarea nivelului căii se face la intervale mai mari. În perioada a III-a, deformațiile remanente se acumulează iar pentru rectificarea nivelului căii sunt necesare lucrări din ce în ce mai costisitoare (ciuruire, curățirea pietrei sparte, completarea prismeii căii, buraje). În perioada a IV-a deformațiile sunt foarte mari și au o evoluție rapidă și imprevizibilă, ceea ce face ca linia să devină impracticabilă.

Compactarea prismeii căii (prin buraj sau vibrare) duce la micșorarea deformațiilor remanente și evoluția lentă a acestora în timp.

#### 4.1. Rezistența opusă de piatra spartă la deriparea căii

Rezistența  $q$  opusă de prisma de piatră spartă la deformarea liniei de cale ferată în sens transversal (fig. 4.54.) este compusă din următoarele elemente:

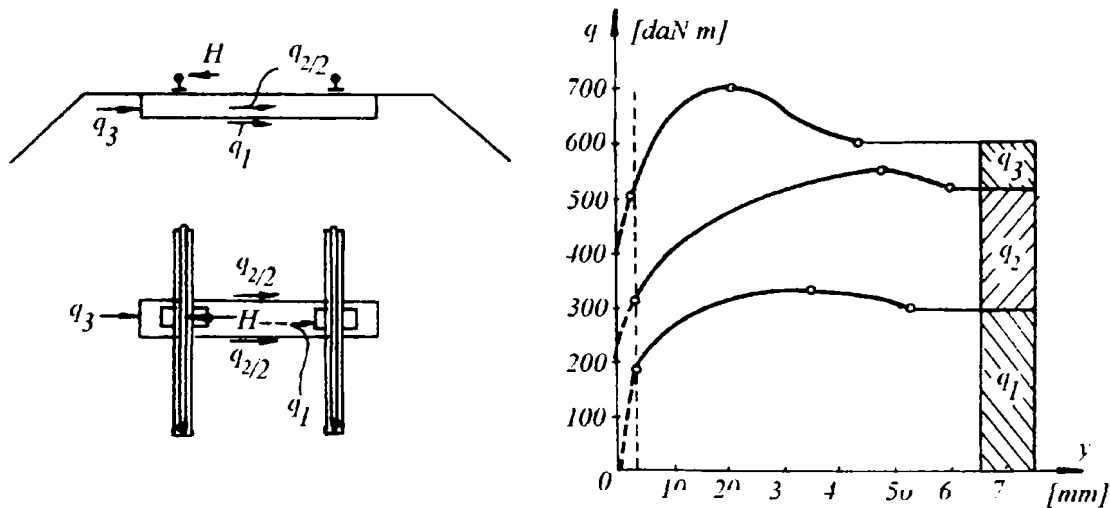
- frecarea dintre talpa traversei și piatra spartă  $q_1$ ;
- frecarea dintre fețele laterale ale traversei și piatra spartă  $q_2$ ;
- rezistența opusă de piatra spartă de la capătul traversei  $q_3$ .

Influența rezistenței  $q$  a pietrei sparte este cea mai importantă din suma rezistențelor care se opun pierderii stabilității C.F.J. Rezultă că este necesar studiul componentelor rezistenței  $q$  și al posibilităților de sporire ale acestora. Ponderea componentelor  $q_i$  din valoarea rezistenței  $q$  este:

$$q_1 \cong 0,5 q;$$

$$q_2 \cong 0,3 \dots 0,45 q;$$

$$q_3 \cong 0,05 \dots 0,2 q.$$



**Fig. 4.54.** Rezistența opusă de piatra spartă la deplasarea laterală a căii ferate

În tabelul 4.8 sunt prezentate valori ale rezistenței  $q$  pentru traverse din beton și traverse din lemn pentru diverse distanțe între traverse.

**Tabelul 4.8.**

Traversa	Traverse din beton			Traverse din lemn		
Distanța între traverse [m]	0,60	0,65	0,77	0,60	0,65	0,77
Rezistența $q$ [N/m]	6640	5640	4390	4590	4290	3820



Componenta cu ponderea maximă a rezistenței  $q$  este cea dată de frecarea dintre talpa traversei și piatra spartă,  $q_l$ . Valoarea acestei componente variază în limite largi în funcție de influența solicitărilor date de materialul rulant, de deformațiile liniei, etc. În cazul lășăturilor oarbe sau pe porțiunile de linie ridicate din cauza solicitărilor verticale (unde negative) date de materialul rulant în mișcare rezistența  $q_l$  poate să se anuleze. Factorii care influențează valoarea rezistenței  $q$  sunt:

- tipul traversei;
- distanța dintre traverse;
- lățimea și forma umărului prismeii căii;
- compactarea pietrei sparte dintre traverse și la capetele traverselor;
- calitatea, forma și dimensiunile pietrei sparte;
- gradul de colmatare al prismeii căii;
- lucrările de întreținere;
- dispozitive pentru sporirea rezistenței  $q$ ;
- lășăturile oarbe;
- solicitările transmise de materialul rulant.

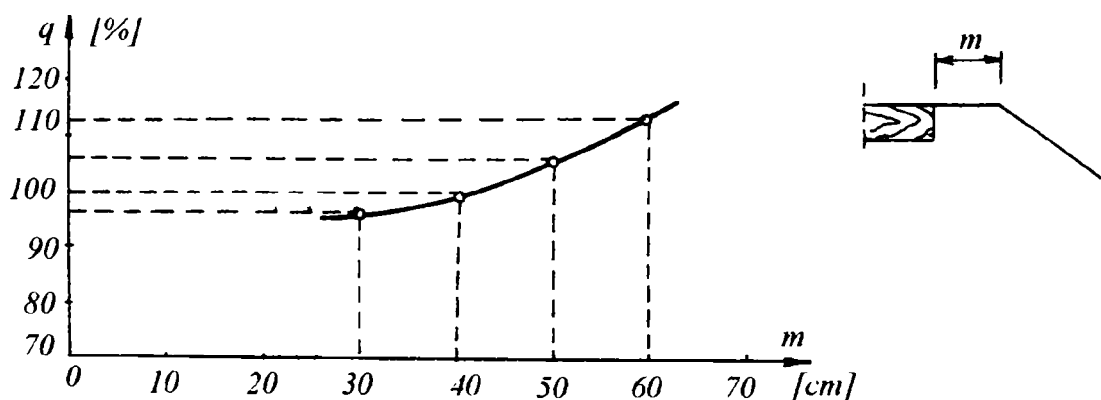
Influența traverselor în valoarea rezistenței  $q$  este determinată de următorii parametri:

- materialul din care a fost realizată traversa;
- greutatea traversei;
- forma traversei;
- rugozitatea tălpii traversei și a fețelor laterale (în cazul traverselor având suprafața rugoasă, rezistența  $q$  sporește cu 10...20 % față de cea corespunzătoare traverselor având suprafața netedă);
- distanța dintre traverse (tabelul 4.9.).

Tabelul 4.9.

Distanța între traverse [m]	Variația rezistenței $q$ [%]
0,75	90
0,70	94
0,65	99
0,63	100
0,60	103
0,55	107
0,50	111

Influența lățimii umărului prismei căii  $m$  asupra mărimii rezistenței  $q$  este prezentată în figura 4.55.



**Fig. 4.55.** Influența lățimii umărului prismei căii  $m$  asupra mărimii rezistenței  $q$ .

Prin utilizarea mașinilor de vibrat piatra spartă dintre traverse și la capetele traverselor se poate obține sporirea rezistenței  $q$  cu 24 ... 30 % așa cum este prezentat în tabelul 4.10.

Prin compactarea pietrei sparte dintre traverse și la capetele traverselor sporesc în mod deosebit componentele  $q_2$  și  $q_3$  așa cum este prezentat în tabelul 4.11.

Tabelul 4.10.

Metoda de compactare	Sporul de rezistență $q$ [%]	
	Traverse din beton	Traverse din lemn
Manual, într-un singur strat	8	12
Manual, în două straturi	16	22
Cu utilaje grele de vibrat	24	30

Tabelul 4.11.

Metoda de compactare	Ponderea rezistențelor $q_1$ față de $q$ [%]					
	Traverse din beton			Traverse din lemn		
	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_1$	$q_2$	$q_3$
Fără compactare	58	37	5	43	49	8
Manual, într-un singur strat	55	38	7	39	51	10
Manual, în două straturi	51	41	8	35	53	12
Cu utilaje grele de vibrat	47	43	10	31	55	14

Se recomandă utilizarea pietrei sparte dublu concasate provenite din roci dure. Dimensiunile pietrei sparte și granulozitatea pot spori rezistența  $q$  cu până la 30 %, așa cum este prezentat în tabelul 4.12.

Tabelul 4.12.

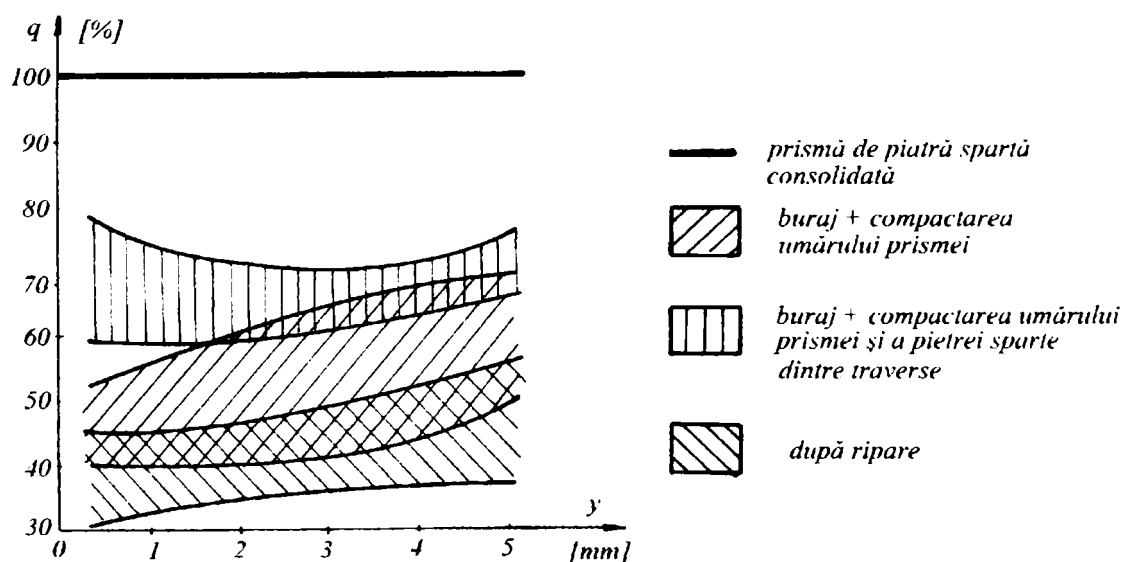
Dimensiunile pietrei sparte	Rezistența $q$ [%]	
	Traverse din beton	Traverse din lemn
40 ... 65	100	100
25 ... 65 și 25 ... 40 în amestec 1:1	120	120
40 ... 65 și 25 ... 40 în amestec 1:1	116	116
25 ... 65	114	113
25 ... 40	90	88

Colmatarea prisme de piatră spartă duce la diminuarea rezistenței  $q$ . În cazul prisme de piatră spartă cu umiditate mare rezistența  $q$  se poate diminua, în funcție de gradul de colmatare, cu 40 ... 50 %. În tabelul 4.13. este prezentată modificarea rezistenței  $q$  în cazul unei căi ferate având distanța între traverse de 65 cm, în funcție de umiditatea și gradul de colmatare a prisme de piatră spartă.

**Tabelul 4.13.**

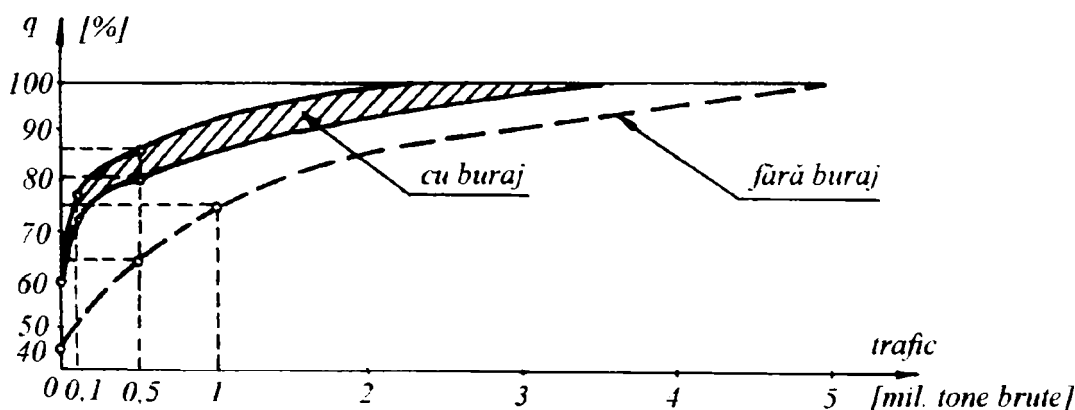
Calitatea prinderii șinei de traverse	Colmatare [%]		
	0	25	40
	Umiditatea prisme		
	uscată	foarte umedă	
	Rezistența $q$ [%]		
Prinderi foarte bine strânse [24 daNm]	100	71	62
Prinderi foarte bine strânse [24 daNm] dar sub fiecare a 3-a traversă - lăsătură oarbă	100	68	56

În cadrul lucrărilor de întreținere care antrenează prisma de piatră spartă scade rezistența  $q$ . Ciuruirea prisme de piatră spartă, riparea liniei, înlocuirea traverselor, etc. duce la diminuarea rezistenței  $q$  cu 30 ... 50 %. În timpul burajului traverselor rezistența  $q$  se poate diminua cu 50 ... 70 % (fig. 4.56.).



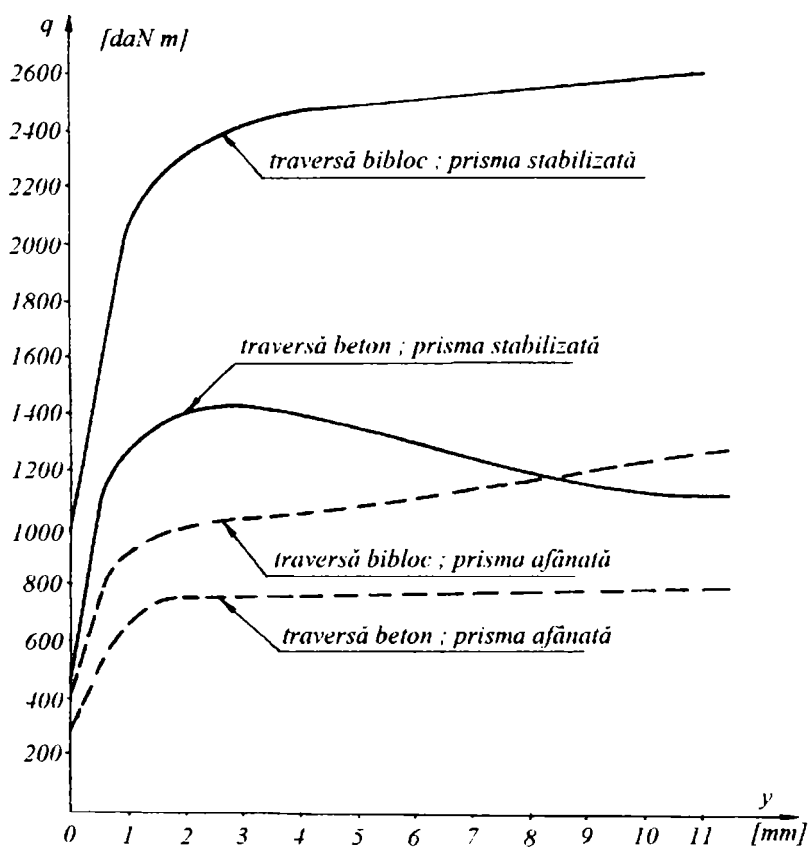
**Fig. 4.56.** Influența lucrărilor de întreținere asupra rezistenței  $q$ .

Pentru ca rezistența  $q$ , diminuată prin lucrări de întreținere, să revină la valoarea inițială este necesară derularea unui trafic de minim 2,5...5 milioane tone brute (fig. 4.57.).



**Fig. 4.57.** Influența traficului asupra rezistenței  $q$ .

În fig. 4.58. sunt prezentate rezultatele unor încercări pentru determinarea valorii rezistenței  $q$  în funcție de tipul traversei și de gradul de compactare a pietrei sparte dintre traverse și la capătul traverselor.

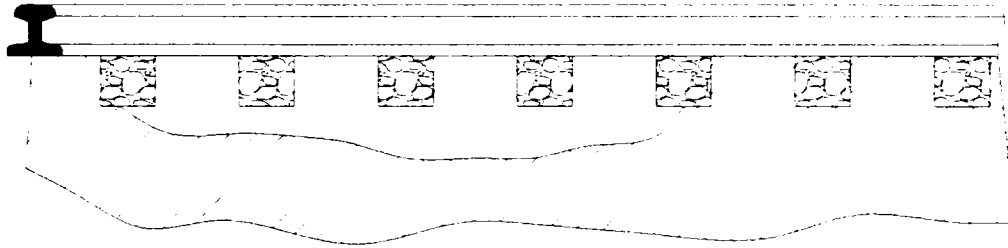


**Fig. 4.58.** Rezistența  $q$  pentru câteva tipuri de traverse.

#### 4.1.1. Lăsăturile oarbe influențează rezistența $q$

În figura 4.59 este prezentat un sector de linie de cale ferată care are lăsături oarbe datorită neasigurării scurgerii apelor de pe platforma căii și a unei întrețineri necorespunzătoare.

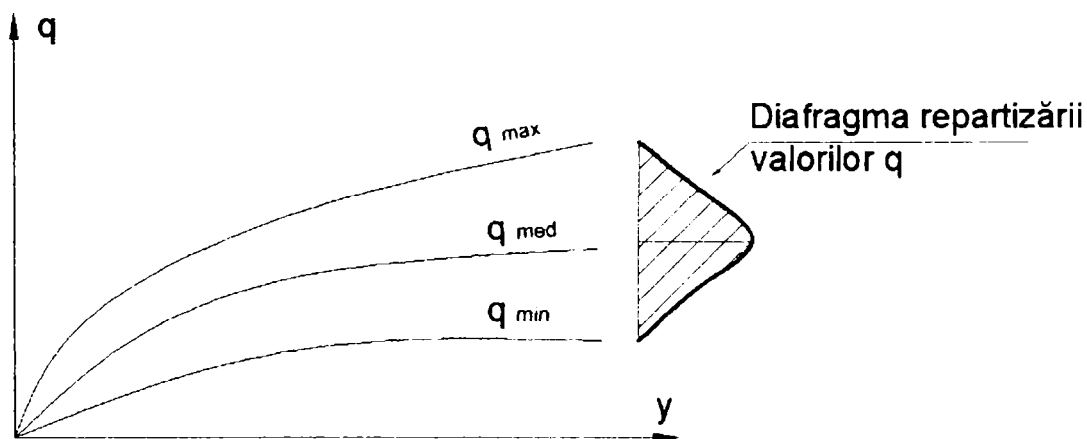
Sub influența solicitărilor dinamice transmise căii de materialul rulant, linia de cale ferată în zona lăsăturilor oarbe se colmatează. În funcție de gradul de colmatare a prisme de piatră spartă rezistența  $q$  scade.



*Fig. 4.59. Linie de cale ferată cu lăsături oarbe*

#### 4.1.2. Variația rezistenței $q$ în lungul căii

Rezistența  $q$  variază în lungul căii în jurul unei valori medii (figura 4.60).



*Fig. 4.60. Repartizarea valorilor rezistenței  $q$  în lungul căii*

La căile ferate cehoslovace (CSD) au fost efectuate încercări experimentale pentru determinarea rezistenței  $q$  pe o linie tip 60 pe traverse din lemn. Au fost măsurate forțele orizontal transversale  $H$  [daN] care produc deriparea  $y$  [mm]. Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în tabelul 4.14 și figura 4.61.

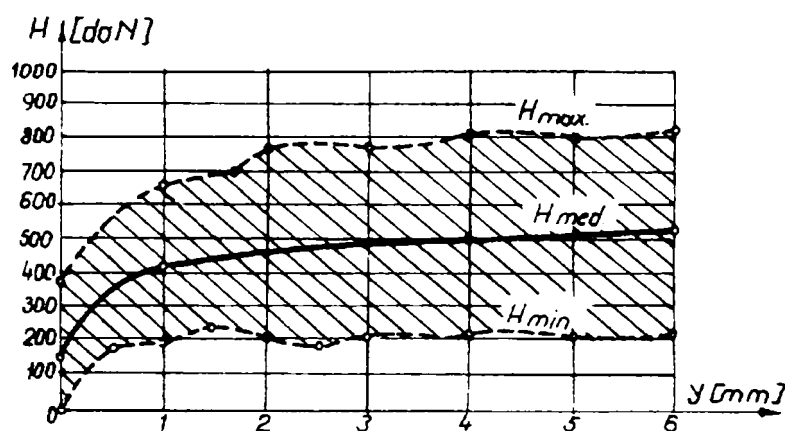


Fig. 4.61. Variația forței  $H$  în lungul căii

Tabelul 4.14.

Deplasarea laterală [ mm ]	Valoarea medie a forței orizontale $H$ [daN] la $i$ zile după refacție		
	$i = 6$ zile	$i = 29$ zile	$i = 76$ zile
0	145	140	160
0,2	330	350	360
0,4	360	435	475
0,8	410	515	595
1,0	425	545	630
1,5	445	570	680
2,0	475	600	710
2,6	485	605	725
3,5	500	615	750
4,0	510	620	750
5,0	520	620	755
6,0	525	645	755

## 4.2. Rezistența opusă de piatra spartă la deplasarea căii în lung

Rezistența  $p$  opusă de prisma de piatră spartă la deplasarea căii în lung se compune din următoarele:

- frecarea dintre talpa traversei și piatra spartă  $p_1$ ;
- frecarea dintre capetele traversei și piatra spartă  $p_2$ ;
- rezistența opusă de piatra spartă dintre traverse  $p_3$ .

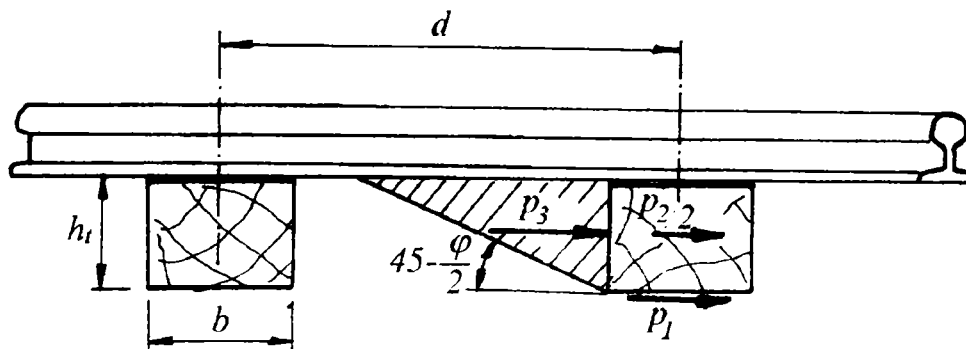
Din încercările experimentale rezultă:

- $p_1 = 0,20 \dots 0,25 p$ ;
- $p_2 = 0,05 p$ ;
- $p_3 = 0,70 \dots 0,75 p$ .

Mărimea rezistenței  $p$  depinde în general de aceiași parametri de care depinde și rezistenței  $q$ :

- caracteristicile pietrei sparte;
- gradul de colmatare a prisme de piatră spartă;
- compactarea prisme de piatră spartă;
- umiditatea prisme de piatră spartă.

Distanța dintre traverse influențează în mod special mărimea componentei  $p_3$  (fig. 4.62.).



**Fig. 4.62.** Componentele rezistenței  $p$ .



Rezistența  $p$  este maximă dacă:

$$d = b + h_t \cdot \operatorname{ctg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4.7)$$

unde:

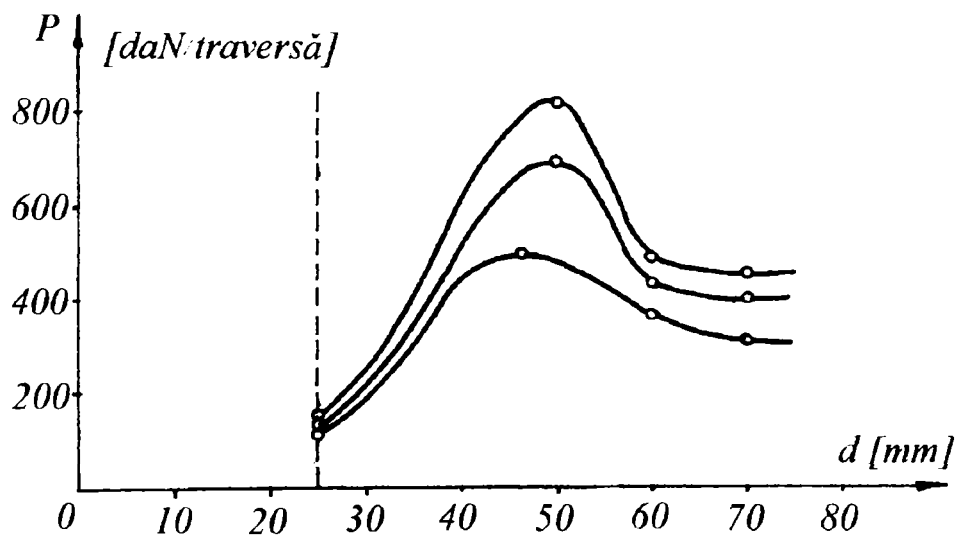
$d$  este distanța dintre traverse;

$b$  - lățimea traversei;

$h_t$  - înălțimea traversei;

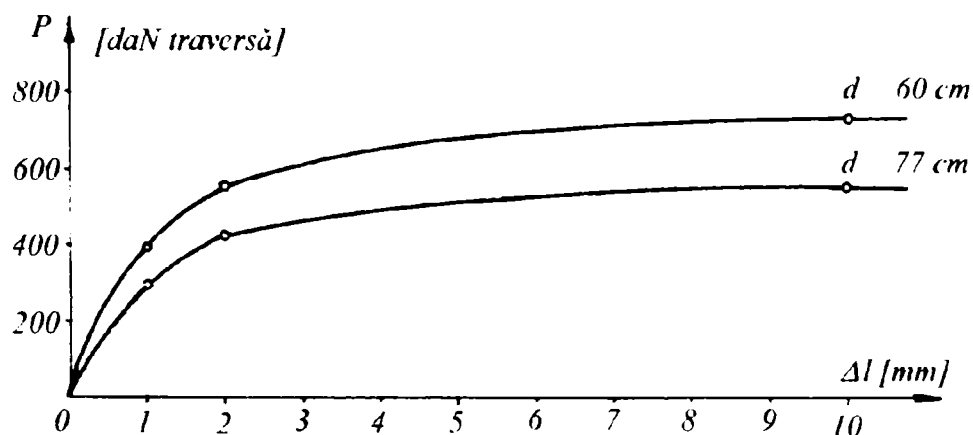
$\varphi$  - unghiul de frecare interioare pentru piatră spartă.

Din motive economice și tehnologice (posibilități de burare) distanța minimă dintre axele traverselor este de circa 50 cm. În figura 4.63. este prezentată variația rezistenței  $p$  în funcție de distanța dintre axele traverselor.



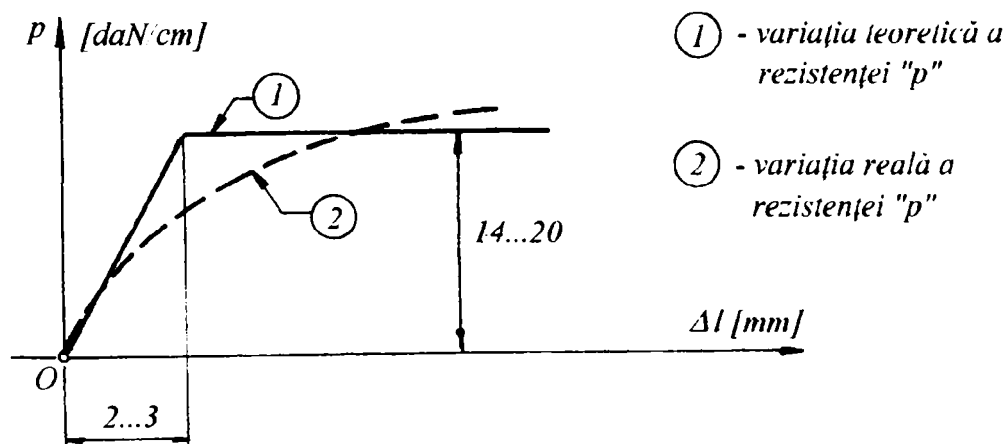
**Fig. 4.63.** Influența distanței dintre traverse asupra rezistenței  $p$ .

În figura 4.64. este prezentată variația rezistenței  $p$  în funcție de mărimea deplasării în lung a liniei.



**Fig. 4.64.** Variația rezistenței  $p$  în funcție de mărimea deplasării în lung.

În cazul unei forțe orizontal-longitudinale mari din variații de temperatură în șină, rezistența  $p$  se poate aprecia că este constantă și egală cu valoarea corespunzătoare unei deplasări de 2 ... 3 mm. În urma unor cercetări experimentale la administrația căilor ferate din Germania s-a stabilit că rezistența  $p$  este de cca. 20 daN/cm la prima deplasare de 2 ... 3 mm și scade la circa 14 daN/cm în cazul deplasărilor succesive și alternative. Încercările au fost efectuate pe o C.F.J. pe traverse din beton. Variația reală și cea teoretică a rezistenței  $p$  sunt prezentate în figura 4.65.



**Fig. 4.65.** Variația rezistenței  $p$ .

Stabilitatea căii fără joante este asigurată doar în condițiile în care rezistențele  $q$  și  $p$  au valori suficient de mari. Tendința actuală de a spori viteza maximă de circulație duce la insuficiență sporită a supraînălțării, ceea ce trebuie compensată prin sporirea corespunzătoare a rezistenței  $q$ .

### 4.3. Rezistența opusă de cale la deformația în plan vertical

Rezistența  $g$  opusă de cale la deformația în plan vertical (la smulgerea cadrului șine-traverse din prisma căii) are două componente:

- greutatea cadrului șine-traverse ( $g_1 \cong 0,7 \dots 0,9 \text{ g}$ );
- rezistența de frecare dintre piatra spartă și fețele laterale ale traverselor ( $g_2 \cong 0,1 - 0,3 \text{ g}$ );

$$g = \frac{G}{d} = g_1 + g_2 \quad (4.8)$$

$G$  reprezintă rezistența la smulgere a căii corespunzătoare unei traverse. În calcule, se consideră  $g_2 \cong 35:d$  [daN/cm] sau  $G_2 = 35$  [daN/traversă].

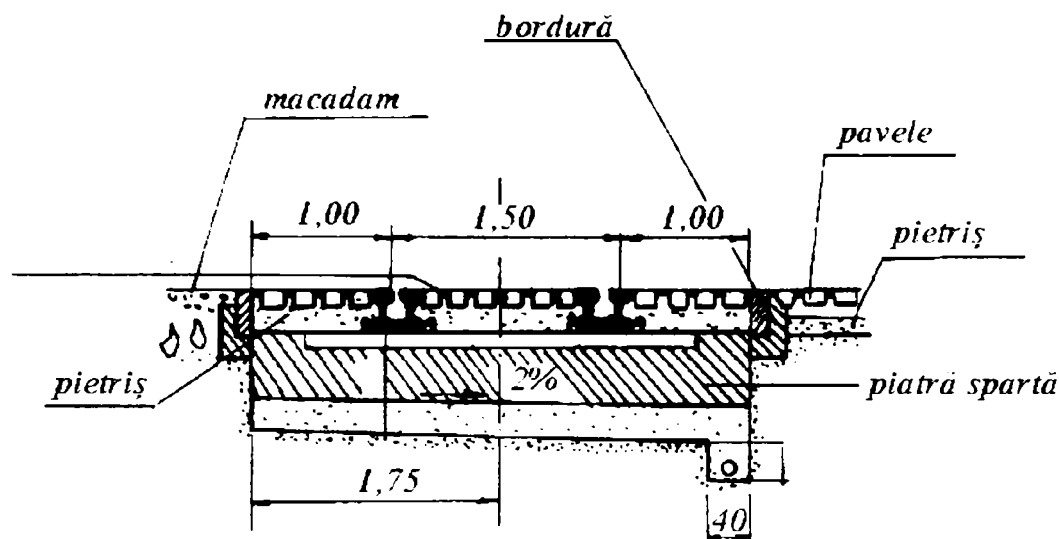
## 5. Suprastructuri speciale

În acest capitol sunt prezentate suprastructuri speciale în dreptul trecerilor la nivel, în curbe, pe poduri și în tuneluri, care trebuie să asigure aceleași condiții ca și liniile obișnuite executate pe terasament.

### 5.1. Suprastructura trecerilor la nivel

În dreptul trecerilor la nivel trebuie asigurată circulația atât a materialului rulant cât și a vehiculelor rutiere în condiții de siguranță deplină a circulației și de

confort sportit. În figura 4.66. este prezentată o secțiune printr-o trecere la nivel pavată.

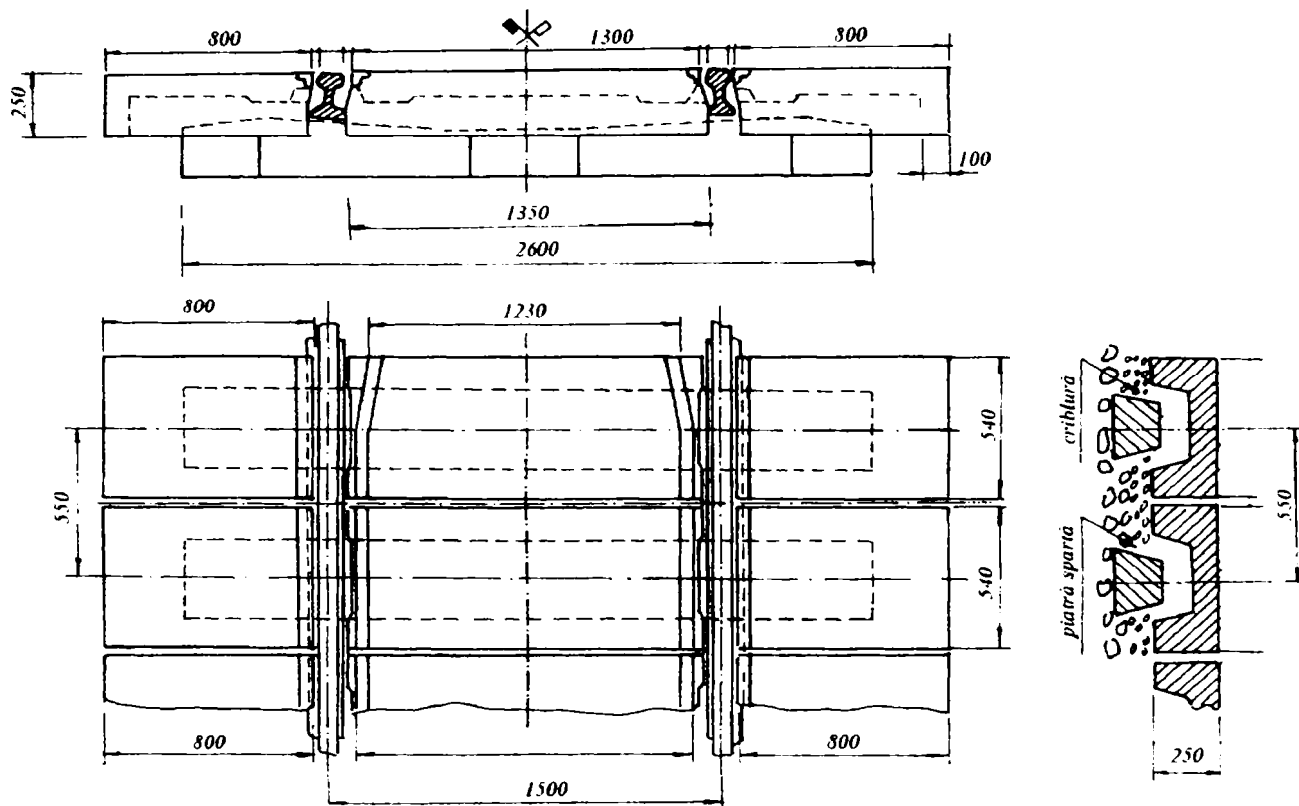


*Fig. 4.66. Secțiune printr-o trecere la nivel.*

În zona trecerilor la nivel trebuie asigurată ghidarea roților materialului rulant. Supravegherea, verificarea, întreținerea și repararea liniei în zona trecerilor la nivel trebuie să se facă ușor.

Lărgimea jgheabului între șină și contra șină în sistemul clasic (fig. 4.66.) respectiv între șină și muchia dalei prefabricate (fig. 4.67.) este de 67 mm în aliniament și curbe cu  $R > 350$  m. În curbele având  $R \leq 350$  m lărgimea jgheabului de 67 mm sporește pe ambele fire cu valoarea supralărgirii prescrise în curbă. La capete lărgimea minimă a jgheabului este de 110 mm. Adâncimea minimă a jgheabului este de 38 mm.

În cazul liniilor pe traverse din beton nu se pot realiza treceri la nivel cu contrașine. Soluția este realizarea trecerilor la nivel cu dale prefabricate din beton armat (fig. 4.67.).

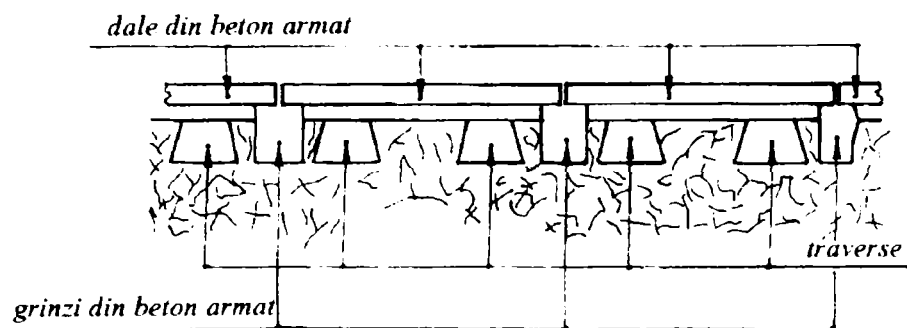


**Fig. 4.67.** Trecere la nivel cu dale prefabricate pe o linie de cale ferată tip 60 sau 65. Vedere și secțiuni.

Infrastructura căii în zona trecerilor la nivel trebuie să fie stabilă și să asigure o bună drenare a apelor. Prisma căii va avea dimensiunile prevăzute. În zona de rezemare a dalei, peste prisma căii se așează un strat de criblură (15...25 mm) de circa 3 cm grosime. Dalele prefabricate utilizate sunt:

- dale interioare de capăt (IC);
- dale interioare curente (I);
- dale exterioare (E).

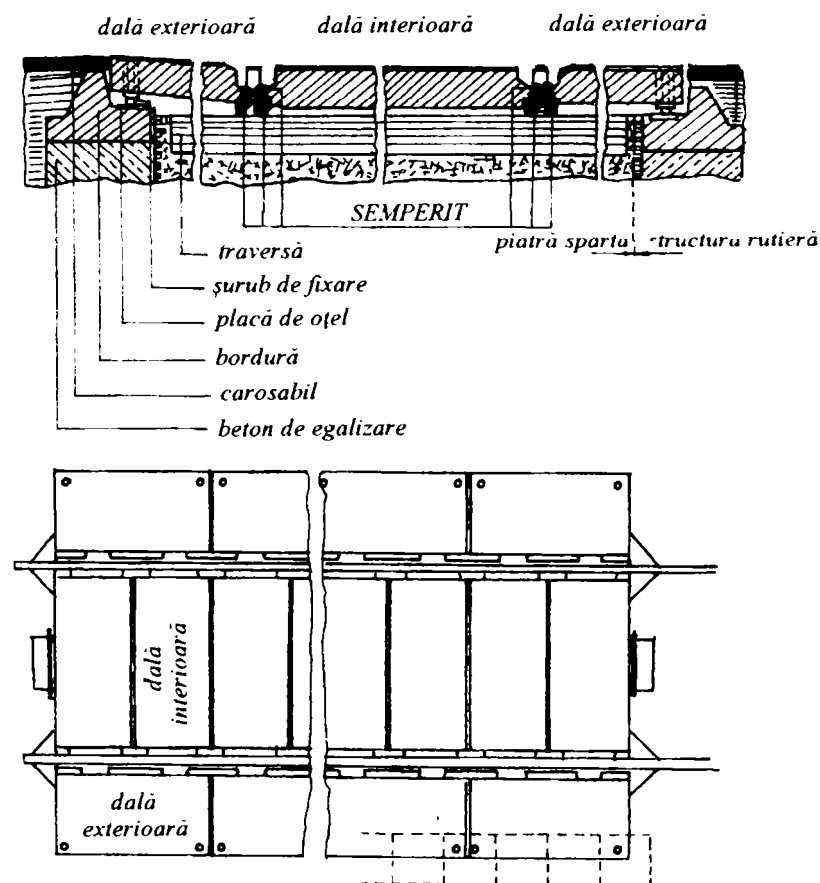
Unele administrații feroviare (DB, ÖBB) utilizează dale prefabricate din beton armat care pot fi așezate pe grinzi din beton (fig. 4.68.).



**Fig. 4.68.** Trecere la nivel cu dale din beton așezate pe grinzi din beton.

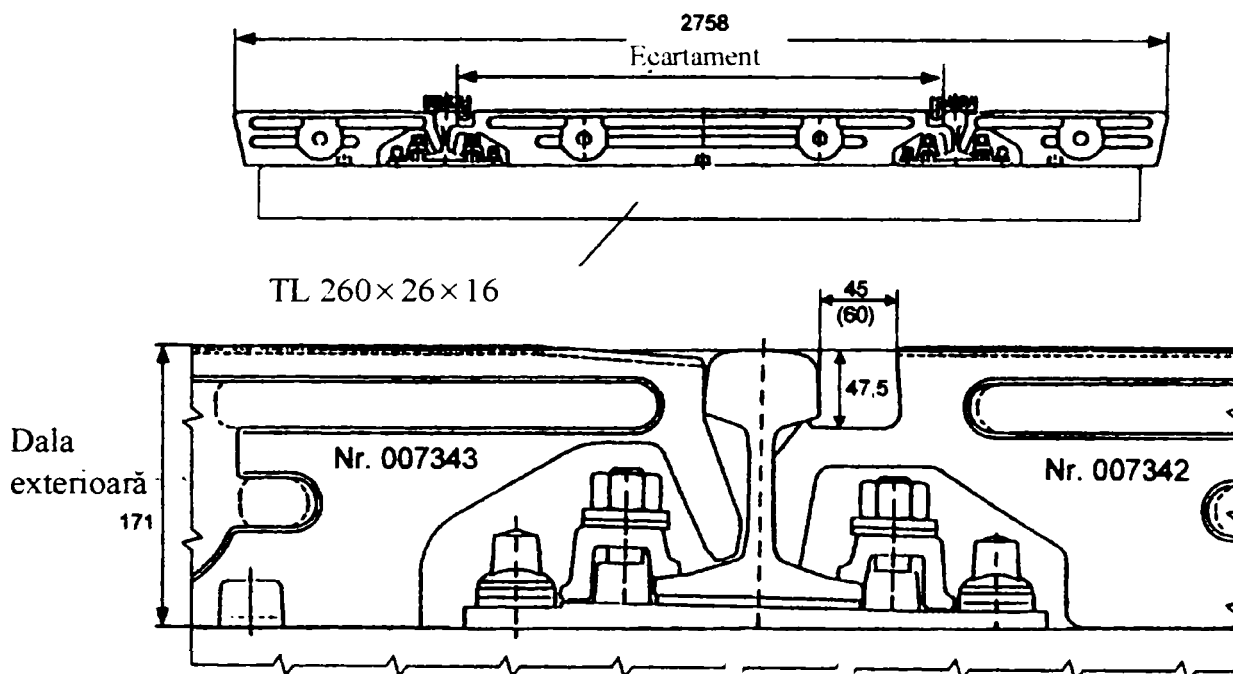
Soluția din fig. 4.68. are dezavantajul că duce la formarea unor scări verticale.

În figura 4.69. este prezentată o trecere la nivel austriacă (sistem Bodan). Fixarea dalelor pe talpa șinei se face cu elemente de cauciuc (SEMPERIT). Fixarea dalelor exterioare cu ajutorul unor șuruburi de reglaj speciale asigură un profil longitudinal eficient pentru drum în zona trecerii la nivel.



**Fig. 4.69.** Trecere la nivel, sistem BODAN.

Un sistem modern de realizare a trecerilor la nivel este sistemul STRAIL din Germania. Plăcile interioare și exterioare cauciucate (fig. 4.70) asigură condiții optime atât pentru confortul călătorilor din tren, cât și pentru cei din autovehicule.



*Fig. 4.70. Trecere la nivel sistem STRAIL*

## 5.2. Contrașine în curbe

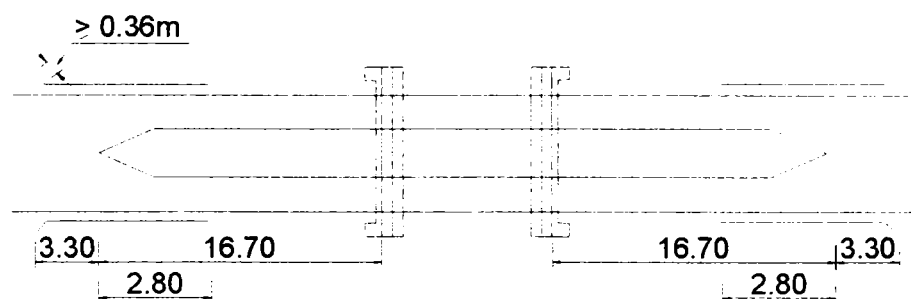
Montarea contrașinelor în curbele având  $R \leq 150$  m este obligatorie pentru asigurarea ghidării corespunzătoare a vehiculelor feroviare. În curbele având  $R = 151 \dots 300$  m cu supralărgiri mari se montează contrașina pentru prevenirea escaladării firului exterior de către roată la demararea materialului rulant oprit pe aceste curbe. Contrașinele se montează în interiorul căii, lângă firul interior. Între fețele laterale vecine ale ciupercilor șinei și contrașinei se lasă un spațiu având adâncimea liberă de cel puțin 38 mm și lățimea de  $45 + S$  [mm], unde  $S$  este supralărgirea, în mm. Nivelul superior al contrașinelor va fi la același nivel sau cel mult 30 mm mai sus decât șina lângă care se află.

Contrașinele trebuie prinse reglementar de fiecare traversă. Contrașinele se prelungesc câte 6 m în aliniamentele vecine. La extremități, contrașinele trebuie cotate către interiorul căii realizându-se la capete jgheabul având lățimea minimă de 110 mm.

### 5.3. Contrașine pe poduri

Contrașinele pe poduri fără cuvă de balast au menirea de a preveni îndepărtarea necontrolată a vagoanelor deraiate. Contrașine se montează la toate podurile fără cuvă de balast, având lungimea mai mare de 10 m în aliniament, respectiv mai mare de 5 m în curbă.

Contrașinele pe poduri se prelungesc și pe terasamente la capetele podului (fig. 4.71.).



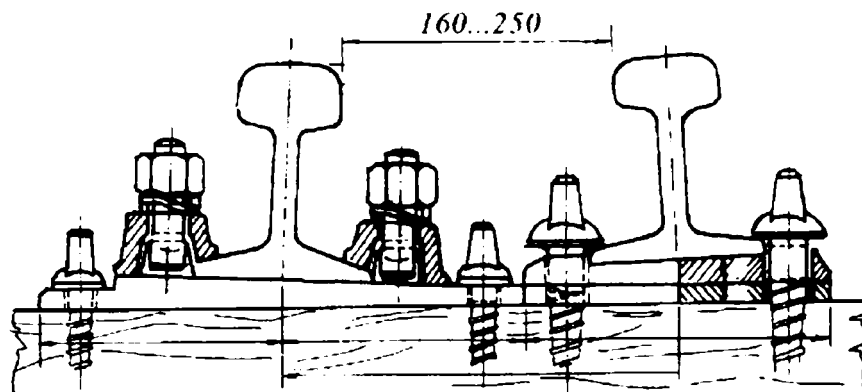
*Fig. 4.71. Contrașine pe poduri.*

Extremitățile contrașinelor interioare de pe terasament se îndoaie în plan vertical și se introduc în piatra spartă sub nivelul superior al traversei, asigurându-se și izolare electrică.

Contrașina se montează și la podurile cu cuvă de balast având suprastructura din grinzi cu calea jos.

Distanța dintre șină și contrașină este de 160 mm. Pe liniile cu prindere indirectă această distanță poate fi de 200 ... 250 mm (fig. 4.72.).





*Fig. 4.72. Contrașina pe pod. Secțiune.*

Contrașinele se montează cu 30 mm deasupra suprafeței de rulare a șinelor, cu toleranțe de (- 30 ... 0) mm.

#### **5.4. Linia de cale ferată în tuneluri**

Alcătuirea liniei de cale ferată clasice din tunel corespunde cu cea de pe terasamente, având aceeași poză a traverselor, același sistem de prindere a șinei de traverse, aceleași dimensiuni ale prismeii căii. În unele cazuri, când înălțimea de construcție a tunelului nu permite realizarea grosimii normale a stratului de piatră spartă și a startului de repartiție, acestea vor putea fi reduse la 20 cm respectiv 15 cm.

În situațiile prezentate mai jos este necesară abandonarea soluției clasice pentru realizarea liniei de cale ferată în tunel:

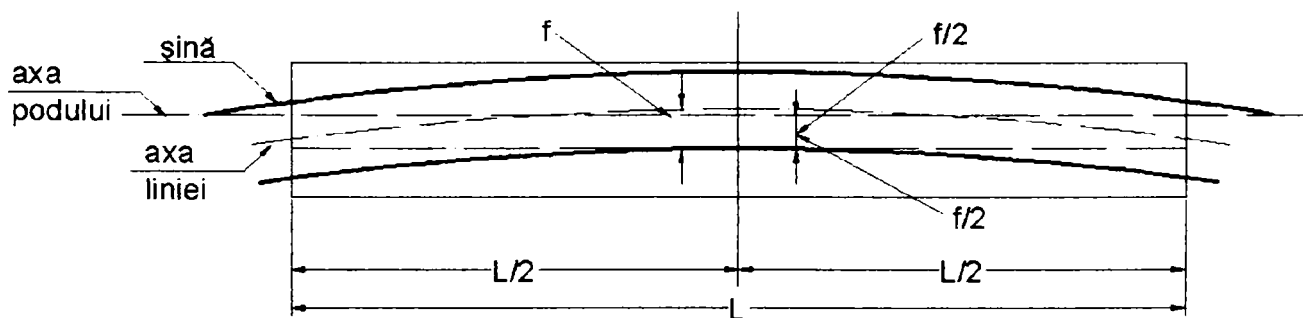
- înălțimea liberă existentă a tunelului nu este suficientă în cazul electrificării liniei de cale ferată respective; eliminarea prismeii căii, a stratului de repartiție și chiar a traverselor duce la un “câștig” de 40...60 cm;
- lucrările de ripare și nivelare a liniilor în tunelurile lungi sunt costisitoare și riscante și pot influența extrem de nefavorabil regularitatea circulației;
- pe liniile în curbă cu raza mică aflate în tunel deriparea liniei poate să ducă la lovirea peretelui tunelului de către materialul rulant în mișcare.

În situațiile sus-prezentate se recomandă ca suprastructura liniei de cale ferată în tunel să se realizeze fără piatră spartă, din blocheți de beton armat legați cu antretoaze sau alte sisteme. Se recomandă ca partea din blochet care se introduce în radierul tunelului să fie îmbrăcată într-un manșon de cauciuc.

Este recomandată utilizarea șinelor cât mai lungi în tunel pentru a micșora numărul de joante, volumul de lucru și costurile necesare pentru întreținerea acestora. Dacă linia în tunel este de cale fără joante, aceasta se va întrerupe la intrările în tunel prin câteva panouri tampon.

### 5.5. Linia de cale ferată pe poduri

În aliniament axa căii pe pod corespunde cu axa podului. La podurile în curbă circulară, axa tablierului este paralel cu coarda curbei pe pod, coarda fiind egală cu deschiderea tablierului (fig. 4.73).



**Fig. 4.73.** Amplasarea tablierului în curbă.

La podurile în curbă de racordare, axa tablierului este paralelă cu coarda curbei pe pod și este situat la jumătatea săgeții maxime.

În cazul căii pe un pod metalic fără cuvă de balast trebuie prevenită dezvoltarea unor forțe orizontale longitudinale cauzate din variația temperaturii atât în șine cât și în elementele podului.

Pe poduri se vor folosi șinele cele mai lungi ale tipului respectiv. Joantele de pe pod se vor amplasa în treimea mijlocie a deschiderii podului. La podurile cu

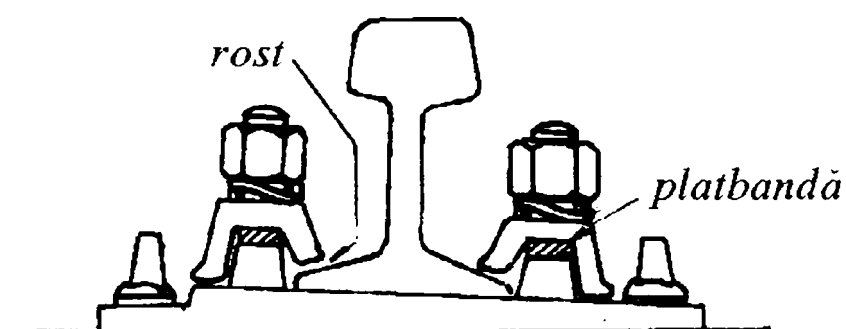
lonjeroane. joanta se va amplasa la jumătatea lonjeronului și la cel puțin 1500 mm de axa antretoazei. Prima joantă de pe terasament se va amplasa la o distanță  $\geq$  2,00 m de zidul de gardă.

Traversele se vor rezema perfect pe tălpile grinzilor căii pe pod pentru a asigura:

- transmiterea centrică a sarcinilor;
- prevenirea producerii de eforturi suplimentare în tălpi și în elemente de îmbinare;
- prevenirea degradării tălpilor și a elementelor de îmbinare.

Calea pe pod trebuie să aibă materialul mărunț complet și bine strâns. Șuruburile verticale pe calea cu joante vor fi strânse la un moment de 24 daNm, iar pe calea fără joante de 3 ... 4 daNm.

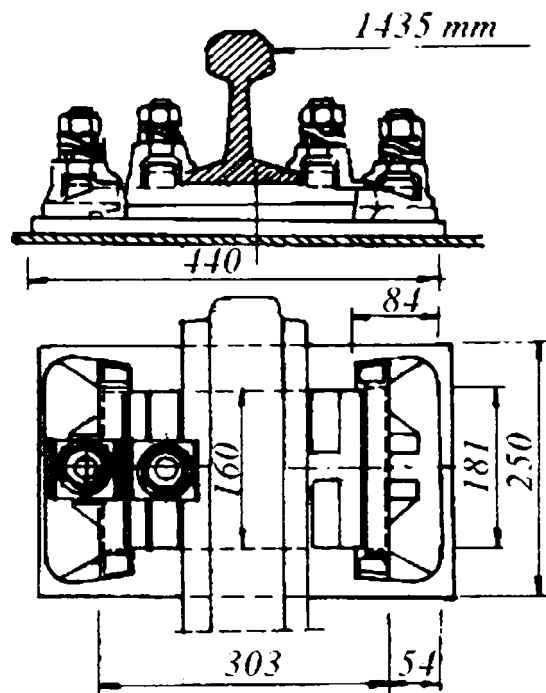
În figura 4.74. este prezentată o soluție de prindere a șinei căii fără joante pe un pod metalic fără cuvă de balast, având deschidere relativ mică.



*Fig. 4.74. Linie C.F.J. pe un pod metalic scurt.*

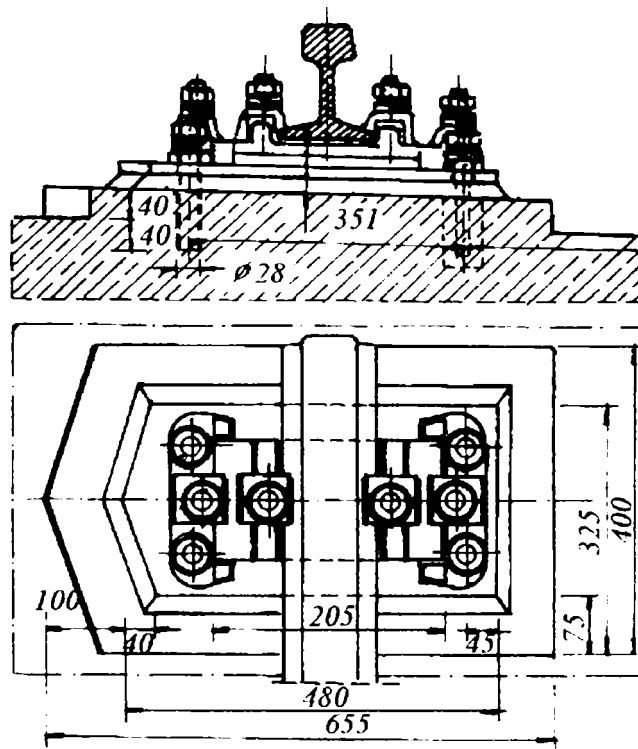
Platbanda de 6 mm previne răsturnarea șinei dar asigură (prin crearea spațiilor libere între cleștii 49 și talpa șinei) dilatarea și contractia relativ liberă a șinelor, împreună cu grinzile podului.

Prinderea șinei C.F.J. pe placa ortotropă a unui pod metalic este prezentată în fig. 4.75.



**Fig. 4.75.** Fixarea șinei C.F.J. pe placa ortotropă a unui pod metalic.

Această prindere este mai ieftină față de cea pe traverse din lemn speciale. În unele situații se construiesc poduri de cale ferată din beton armat, fără cuvă de balast, unde șinele sunt fixate direct pe placa din beton armat (fig. 4.76.).



**Fig. 4.76.** Prinderea șinei C.F.J. pe un pod din beton fără cuvă de balast.

## 1. Caracterul legic al deformațiilor căii ferate

Pentru deformațiile și uzurile elementelor căii ferate este nevoie de lucru mecanic care este produs de mișcarea continuă a vehiculelor de cale ferată. O parte a energiei cinetice a materialului rulant se transformă în lucru mecanic necesar pentru deformarea și uzura căii, iar o parte pentru deplasare. Această pierdere de energie se manifestă pe de o parte ca o rezistență întâmpinată de vehicul în mers, care se poate măsura, evalua, pe de altă parte ca energie termică produsă de mișcările oscilante ale vehiculului, energie care se pierde.

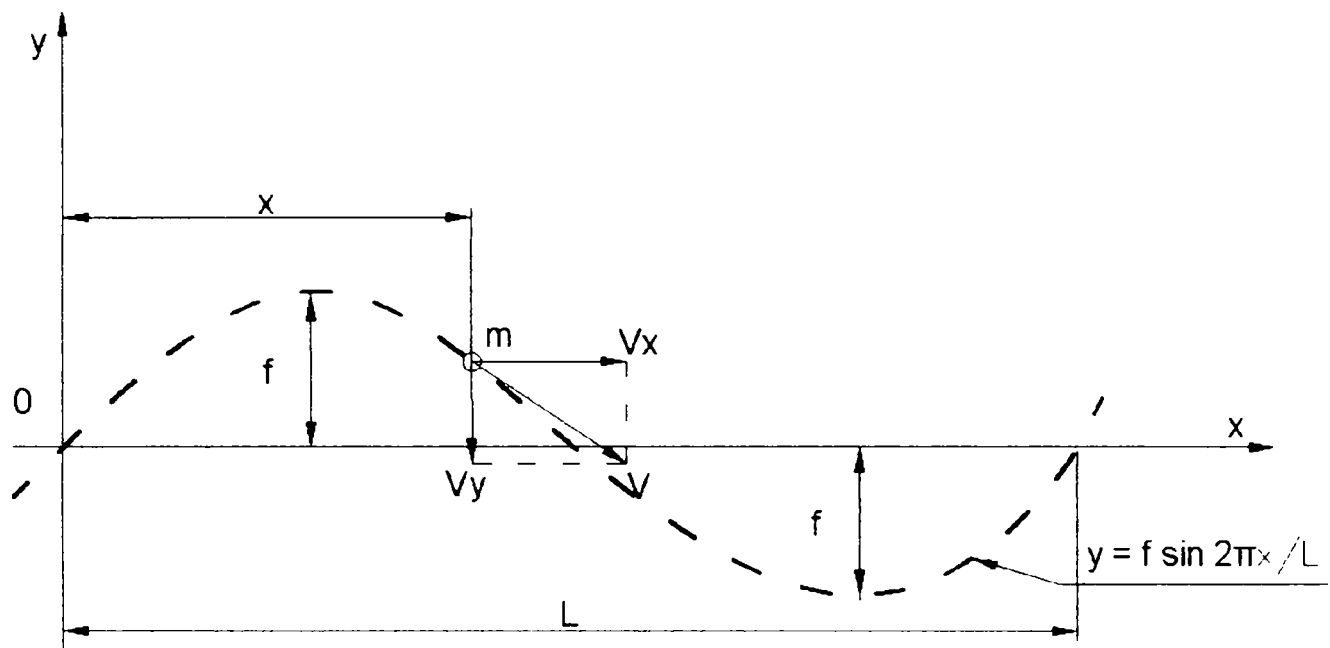
Rezistențele întâmpinate de vehicule în mers sunt cu atât mai mari cu cât deformațiile și uzurile căii sunt mai pronunțate. Energia consumată pentru învingerea acestor rezistențe, crește proporțional cu rezistențele întâmpinate. Energia aceasta sporită duce la accentuarea deformațiilor căii. Degradarea căii se manifestă și prin uzura și oboseala materialelor din componența ei.

Calea va „sustrage” energie cinetică de la vehiculul în mișcare numai atunci când îi modifică vectorul mișcării. Pentru aceasta este necesară o deformație a căii.

Aceste relații și interdependențe sunt prea complicate pentru a putea fi analizate. De aceea fenomenul studiat va fi simplificat prin modele logice, modele ale realității simplificate. Modelul logic ales trebuie să permită o generalizare a fenomenului studiat.

Se va considera calea având o direcție sinusoidală continuă (fig. 5.1), exprimabilă prin ecuația( fig. 5.1)

$$y = f \cdot \sin \frac{2\pi}{L} \cdot x \quad (5.1)$$



**Fig. 5.1.** Model pentru studiul evoluției deformațiilor căii

Pe acest traseu sinusoidal se mișcă vehiculul de masă „m” redus la un punct. Se consideră că viteza de translație a vehiculului  $-V_x$ - este constantă. Se acceptă că  $V_x \approx V$ , unde  $V$  este viteza după direcția tangențială la ecuația traseului într-un punct oarecare. Se va descompune viteza  $V$  după componentele  $V_x$  și  $V_y$ , unde direcția lui  $V_y$  va fi permanent perpendiculară pe direcția  $V_x$ .

În relația (5.1)  $f$  este amplitudinea, iar  $L$  este lungimea de undă a sinusoidei. Ecuația (5.1) arată distanța de la abscisă la punctul de masă  $m$  (abscisa reprezentând direcția de mișcare ideală) la distanța  $x$  de la punctul  $O$ . Rezultă că  $y_{\max} = f$ .

Se vor scrie următoarele relații cunoscute:

$$V_y = \frac{dy}{dt \cdot L} = f \cdot \frac{2\pi}{L} \cdot \cos \frac{2\pi x}{L} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (5.2)$$

$$V_x = \frac{dx}{dt} \quad (5.3)$$

$$V_y = V_x \cdot f \cdot \frac{2\pi}{L} \cdot \cos \frac{2\pi x}{L} \quad (5.4)$$

Prin derivare se ajunge la expresia accelerației :

$$a_y = \frac{d^2 y}{dt^2} = -V_x \cdot f \cdot \frac{4\pi^2}{L^2} \cdot \sin \frac{2\pi x}{L} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (5.5)$$

$$a_y = -V_x^2 \cdot f \cdot \frac{4\pi^2}{L^2} \cdot \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (5.6)$$

Ținând cont de faptul că :

$$\left| \sin \frac{2\pi x}{L} \right|_{\max} = 1 \text{ și } \frac{4\pi^2}{L^2} = C_1 = \text{constant se obține :}$$

$$a_{y \max} = V_x^2 \cdot f \cdot C_1 \quad (5.7)$$

Din a doua lege a lui Newton, ( $F = m \cdot a$ ) se poate obține valoarea maximă a sollicitării orizontale transversale:

$$P_{y \max} = m \cdot V_x^2 \cdot f \cdot C_1 \quad (5.8)$$

Se presupune că forța  $P_{y \max}$  produce un lucru mecanic și modifică traseul mișcării după direcția  $y$  cu o valoare infimitezimală  $df$ . Se consideră că fenomenul se află în zona de valabilitate a legii lui Hooke, adică:

$$df = P_{y \max} \cdot \alpha_1 \quad (5.9)$$

unde,  $\alpha_1$  este un factor de proporționalitate. Înlocuind în relația (5.9) expresia (5.8) și considerând că din masa totală „ $m$ ” doar o cantitate mică „ $dm$ ” trece la un moment dat prin punctul cu defectul de direcție considerat, se va obține:

$$df = dm \cdot V_x^2 \cdot f \cdot C_1 \cdot \alpha_1 \quad (5.10)$$

Se poate scrie  $\alpha_1 \cdot C_1 = \alpha$ , relația devenind :

$$df = f \cdot \alpha \cdot dm \cdot V_x^2 \quad (5.11)$$

Se menționează că  $\alpha$  este un coeficient care depinde de tipul de șină, tipul traversei și distanța între traverse, deci caracterizează cadrul șină – traverse.

Relația (5.11) va fi scrisă astfel :

$$\int \frac{df}{f} = V_x^2 \cdot \alpha \cdot dm \quad (5.12)$$

$$\ln f = \alpha \cdot m \cdot V_x^2 + C_2 \quad (5.13)$$

$$f = e^{\alpha m V_x^2 - C_2} = e^{\alpha m V_x^2} \cdot e^{-C_2} \quad (5.14)$$

Notând :  $e^{-C_2} = C$  și considerând  $V_x = V$  se obține:

$$\boxed{f = C \cdot e^{\alpha m V^2}} \quad (5.15)$$

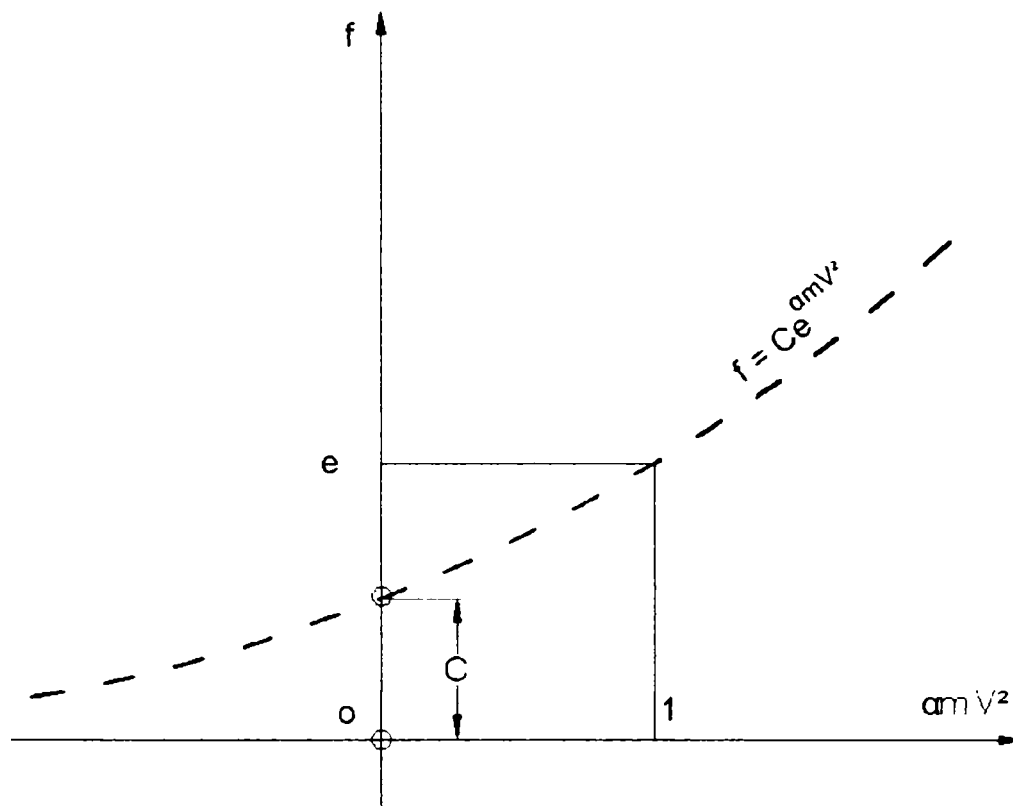
Această relație se poate numi „legea deformării căii ferate”. În această relație „f” exprimă mărimea defectului sau, generalizând, gradul de deformație a căii, „ $mV^2$ ” este dublul energiei cinematice a vehiculului, „c” este un coeficient care caracterizează starea de întreținere a căii iar  $\alpha$  este o constantă care caracterizează cadrul șină - traversă.

Valoarea lui e (baza logaritmului natural ) este  $e=2,708$ .

Ultima relație va fi reprezentată în sistemul de coordonate carteziene. Se obține astfel o curbă exponențială (figura 5.2) care oglindește „legile” evoluției deformațiilor căii ferate. Acestea sunt următoarele:

- Dacă  $\alpha m V^2 \rightarrow -\infty$  , atunci  $f \rightarrow 0$  , deci abscisa este tangentă la curbă;
- Variabila  $mV^2$  apare în exponent, ca atare starea căii se degradează în salturi, exponențial, în funcție de energia cinematică a vehiculelor care o parcurg. Energia parțial este consumată pentru deformarea căii. Cu cât calea este mai deformată, cu atât energia consumată pentru tractarea trenurilor este mai mare. Deformarea căii este un proces autoagravant;
- Curba va intersecta axa verticală în punctul cu ordonata C. Se observă că starea căii după terminarea unor lucrări de întreținere, reparații, etc.; până la trecerea primului tren este caracterizată de coeficientul C. Cu cât valoarea lui c este mai mică, cu atât calitatea lucrărilor de întreținere este mai bună.





**Fig. 5.2.** Reprezentarea funcției  $f = C \cdot e^{\alpha m V^2}$

Dacă se modifică valoarea coeficientului  $C$ , devenind  $C_1 < C$  după relația:

$$C_1 = C \cdot e^{-\alpha m_1 V^2} \quad (5.16)$$

atunci:

$$f = C_1 \cdot e^{\alpha m V^2} = C \cdot e^{\alpha m V^2 - \alpha m_1 V^2} = C \cdot e^{\alpha(m - m_1) V^2} \quad (5.17)$$

Prin relația 5.17 s-a procedat de fapt la translația sistemului de coordonate : a fost translatată curba exponențială la dreapta cu valoarea  $m_1$ . Rezultă că modificarea calității lucrărilor de întreținere nu influențează ciclul deformațiilor ca fenomen. Dar, dacă se va îmbunătăți calitatea lucrărilor de întreținere, între două intervenții la cale pe o anumită secțiune, va putea trece un volum sporit de trafic (mai multe tone brute, mai multe vagoane, viteză mărită).

Legendă

- Intreținere de calitate slabă
- - - Intreținere bună

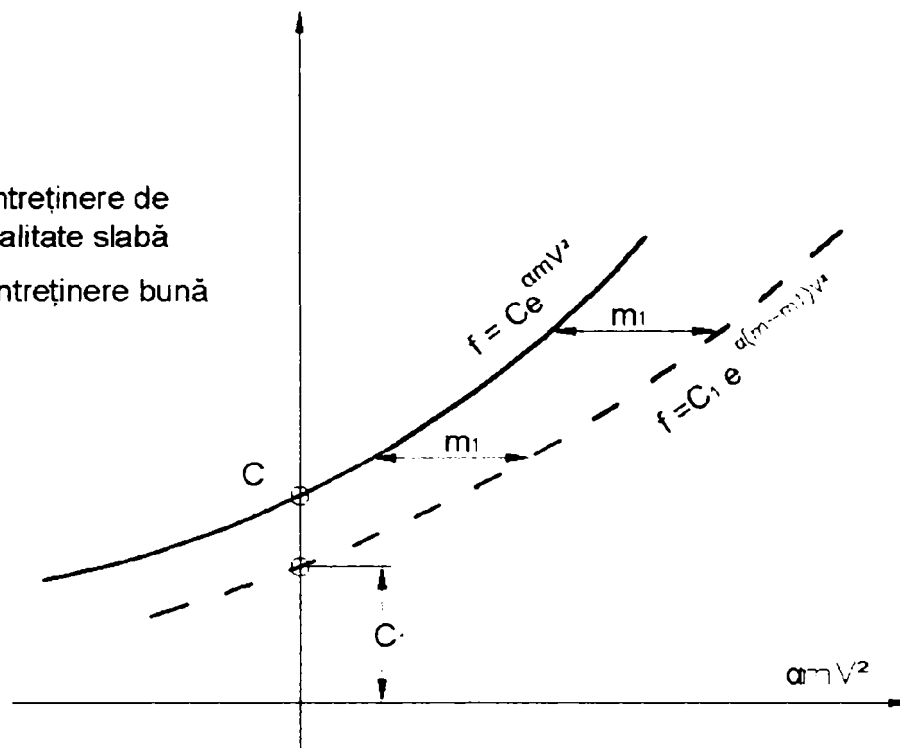


Fig. 5.3. Translația funcției  $f = C \cdot e^{\alpha m v^2}$

Această lege a deformării căii ferate demonstrează că întreținerea corespunzătoare, de calitate are valoare economică deosebită (fig. 5.3). E momentul să se arate că legea deformării, care demonstrează că nu există cale perfectă, poate fi formulată și astfel:

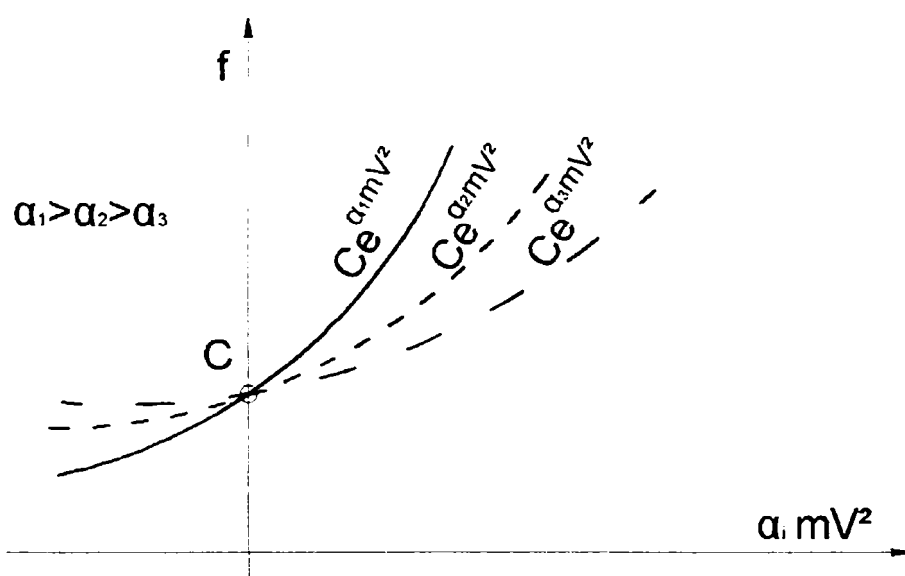
**„Nu există o cale atât de bună încât să nu poată fi perfecționată prin îmbunătățirea calității lucrărilor de întreținere ”.**

- d. Derivata funcției exponențiale este proporțională cu funcția propriu-zisă, adică viteza cu care evoluează deformația este direct proporțională cu mărimea ei.

Se subliniază că prin viteza evoluției deformației nu înțelegem o expresie măsurată în m/s ci una măsurată în unități  $f/mv^2$ . Pe anumite porțiuni izolate mai lungi sau mai scurte, calea se poate deforma rapid, devenind de la o zi la alta periculoasă pentru siguranța circulației trenurilor.

e. Constanta  $\alpha$  apare în exponentul funcției  $F(mv^2)$ , adică: suprastructură de calitate slabă și solicitări mari înseamnă valoare mai mare pentru  $\alpha$ , ceea ce duce la degradarea accentuată a căii. Forma curbei exponențiale  $y = C \cdot e^{\alpha mv^2}$ , în funcție de diferite valori ale lui  $\alpha$  arată ca în figura 5.4.

Degradarea căii nu se poate aprecia doar printr-o singură caracteristică, astfel deformația ecartamentului nu poate fi o valoare care să caracterizeze ea singură starea căii ferate când prisma de balastare este colmatată și când există pericolul formării unor pungi de apă. Deci deformația  $f$  nu poate fi considerată ca o simplă valoare, ci ca o măsură care caracterizează starea generală de depreciere, degradare a căii ferate.



**Fig. 5.4.** Forma curbei  $y = C \cdot e^{\alpha mv^2}$  în funcție de calitatea suprastructurii

f. Defectele cantitative caracteristice stării căii ferate (măsurabile) se transformă în defecte calitative. Defectele cantitative pot produce distrugeri (ruperi) de material, deformații ale materialului din suprastructură.

Se vor arăta pe rând sarcinile directe care rezultă pentru activitatea de întreținere din interpretarea primelor 5 legi (a...e) precum și principiul general de întreținere care rezultă din cea de a șasea lege (f).

- a) Este adevărat că nu se poate realiza o cale ferată cu o geometrie perfectă, drept pentru care trebuie stabilite limite ale elementelor geometrice. Când organele de întreținere preiau o cale ferată nouă (sau refacționată) vor urmări ca ea să corespundă prescripțiilor tehnice, instrucțiunilor, reglementărilor, deoarece cu cât este mai bună calitatea căii ferate noi, cu atât mai redus va fi volumul lucrărilor de întreținere și implicit și costul acestor lucrări. Nu există o cale ferată care să nu poată fi îmbunătățită;
- b) După ce degradarea căii ferate este o funcție a energiei cinematice a vehiculelor care o solicită în mod regulat, organele de întreținere a căii trebuie să-și planifice și organizeze activitatea astfel, încât să mențină calea în parametri optimi în condiții cât mai economice.
- c) Ținând cont de faptul că odată cu îmbunătățirea calității lucrărilor de întreținere se poate obține ca pe calea ferată, până la prima refacție, să se deruleze un volum mai mare de trafic, în activitatea de întreținere trebuie acordată o atenție deosebită creșterii calității și perfecționării acesteia.
- d) Așa cum s-a arătat, viteza de creștere a deformațiilor este direct proporțională cu mărimea și stadiul lor. Deci trebuie acordată atenție deosebită ca această degradare să nu se accelereze brusc. Rezultă că defectele izolate trebuie eliminate urgent pentru a nu reprezenta pericol pentru siguranța circulației. Acest deziderat se poate obține numai prin activitate de supraveghere organizată și sistematică. Supravegherea căii este indispensabilă și din alte motive (calamități, stabilitatea căii fără joante).
- e) Organele de întreținere supraveghează ca linia să fie solicitată conform prevederilor (viteză, sarcini pe osie etc.) deoarece

solicitări mai mari față de cele prevăzute (pentru care a fost proiectată calea ferată) duc la degradarea accelerată a căii.

- f) Din cea de-a șasea lege se poate deduce că important este a elimina cauza defectului, a deformației iar organele de întreținere nu trebuie să fie niciodată mulțumite doar cu eliminarea sau remedierea defectului propriu-zis.

## **2. Particularitățile lucrărilor de întreținere**

Față de alte lucrări sau mijloace de producție, lucrările de întreținere a căilor ferate au un caracter specific, particularități neîntâlnite la celelalte lucrări.

a) Lucrările de întreținere se fac în timpul exploatarei, sub circulație. Riscul trebuie să fie minim pentru cei care lucrează precum și pentru siguranța circulației. Din această cauză, răspunderea aceluia care execută lucrarea de întreținere este foarte mare în special în ce privește respectarea cu strictețe a măsurilor de siguranța circulației. Timpul în care se execută lucrarea este scurt – între două trenuri. Dacă lucrările nu sunt organizate corespunzător, se produc perturbații în circulația trenurilor. În alte situații este necesară introducerea de restricții de viteză sau chiar închiderea liniei (întreruperea circulației trenurilor pentru un anumit interval de timp).

Se poate constata că între întreținerea drumurilor și a căilor ferate este o mare diferență. La drumuri restricțiile de viteză sau lucrările provizorii influențează într-o măsură mai mică siguranța și regularitatea circulației. Totodată există posibilitatea organizării circulației, provizoriu pe un drum ocolit.

Calea ferată prezintă particularitatea că șinele ghidează materialul rulant, ca atare circulația trebuie obligatoriu desfășurată pe această cale și cu siguranță suficientă. Importanța întreținerii corespunzătoare a căii ferate poate fi ilustrată și

prin faptul că neasigurarea condițiilor de siguranță pentru circulația unui tren de 2000... 3000 tone cu viteze de 80... 100 km/h, poate duce la catastrofe. Catastrofa nu se produce datorită unor greșeli mari, vizibile, cum ar fi scoaterea unei șine din cale, ci la erori mici. De exemplu, o intervenție la o cale fără joante, vara, când temperatura șinei a depășit 50 °C, pentru corectarea nivelului longitudinal prin ridicarea liniei cu vinciurile, a dus la șerpuirea liniei, deraierea și răsturnarea a 17 vagoane încărcate cu produse de import.

Securitatea și protecția muncii au o importanță deosebită, lucrările executându-se în gabaritul căii, foarte multe accidente sunt mortale, chiar colective. Responsabilitatea pentru executarea lucrărilor de întreținere sub circulație revine integral conducătorului lucrării (picher, maistru, subinginer sau inginer). Această responsabilitate este mult mai mare decât la construcții de linii noi, pentru că imediat după terminare, trece trenul peste lucrare.

b) Se lucrează în condiții grele, de intemperii. Lucrările de întreținere sunt influențate de variațiile de temperatură, de ploi, de apă, de anotimp, de calamități naturale, etc.

c) Pentru cei care conduc lucrări de întreținere sau reparații de căi ferate trebuie cunoscute o serie de legiferări, instrucții, care reglementează întreaga activitate cu toate amănuntele, detaliile. Instrucțiile se bazează pe calcule matematice, statice și pe o bogată experiență de zeci de ani. Seriozitatea și importanța problemei este ilustrată și prin faptul că UIC are sute de specialiști care lucrează doar la elaborarea acestor norme.

d) Inginerul care coordonează lucrările de întreținere și reparații de căi ferate trebuie să dea dovadă de: promptitudine, operativitate, precauție deosebită, subordonare totală ca la armată, disciplină, seriozitate, respectarea dispozițiilor, atenție și grijă deosebită, punctualitate, conștiinciozitate, interes față de meseria aleasă. Toate acestea sunt necesare pentru că trenul vine peste lucrare și orice

superficialitate sau incompetență manifestată în executarea lucrărilor poate duce la evenimente nedorite, chiar catastrofe.

Calea ferată este o construcție elastică, sollicitată dinamic de materialul rulant. Elasticitatea căii este o caracteristică foarte importantă. În cazul în care calea ar fi rigidă, din calcule ar rezulta dimensiuni mult mai mari pentru elementele căii, ceea ce ar duce la creșterea deosebită a cheltuielilor de construcție și de întreținere.

Calea clasică, așa cum a fost ea construită, mai îndeplinește o condiție esențială, care completează elasticitatea căii și dă încredere(tărie) liniei ferate: capacitatea de a fi întreținută. O cale ferată care nu poate fi întreținută nu este economică. Încercările, din trecut și în prezent, de a se construi căi ferate solide, astfel ca întreținerea să coste puțin sau deloc, nu au dat rezultate, mai ales în cazul traficului intens și a celui preponderent de marfă.

Se încearcă și în prezent construirea unor căi solide, rigide(estacade, monoraiuri, etc.) care să necesite lucrări de întreținere reduse, dar acestea nu sunt căi ferate clasice și nu sunt apte pentru trafic intens. Ele sunt de perspectivă pentru traficul de călători.

Dacă se ia în considerare o cale ferată cu un trafic de 15 milioane tone brute pe an iar sarcina medie pe osie este de 150 kN, rezultă un milion de osii care trec anual într-o secțiune a liniei și care produc un milion de deformații la nivel. Chiar dacă numai 1/100 000 din aceste deformații rămân remanente și o deformație este doar 1 mm, rezultă deformația totală pe an de 10 mm. În cazul unei linii în exploatare pe care se circulă cu viteză mai mare de 50 km/h nu este admisă denivelarea căii mai mare de 5 mm. În aceste condiții sunt necesare două intervenții pe an pentru corectarea nivelului căii.

Rezultă că întreținerea și reparația căii ferate reprezintă un volum foarte mare de lucrări. Executarea lor necesită un sistem de depistare a defecțiunilor, de

programare și executare a remedierilor, astfel încât să nu se încarce costul exploatareii iar condițiile de siguranță asigurate să fie maxime.

Această problemă este greu de rezolvat, întrucât criteriile sunt contradictorii (cost și confort; cost și siguranță). Rezolvarea problemei solicită foarte multe cunoștințe, ingeniozitate, supravegherea continuă a liniei în vederea prevenirii defecțiunilor și a deformațiilor care depășesc toleranțele admise, organizarea optimă a lucrărilor de întreținere.

Mărimea deformațiilor remanente depinde de raportul dintre solicitări și capacitatea portantă a căii, dată de tipul de suprastructură. Solicitățile sunt exprimate de mărime și frecvență. Mărimea solicitărilor este dată de sarcina pe osie a vehiculelor de cale ferată, amplificată cu coeficientul dinamic care reprezintă efectul vitezei de circulație. Frecvența solicitărilor este dată de numărul de osii care circulă printr-o secțiune a căii în unitatea de timp și se poate exprima în tone brute pe zi sau tone brute pe an.

Din punct de vedere al mărimii solicitărilor (sarcinii pe cale) liniile se clasifică astfel:

- linii cu sarcina maximă pe osie egală sau mai mare de 205 kN;
- linii cu sarcina maximă pe osie sub 205 kN;

Din punct de vedere al vitezei de circulație liniile se clasifică în felul următor:

- linii cu viteze mici, sub 40 km/h, cum sunt liniile industriale, liniile în stații în afara liniilor directe;
- linii cu viteze medii ( $40 < V < 80$  km/h), cum sunt liniile secundare, locale etc.;
- linii cu viteze obișnuite ( $80 < V < 120$  km/h), cum sunt liniile principale și majoritatea liniilor magistrale;



- linii cu viteze sporite ( $120 < V < 140$  km/h), cum sunt unele tronsoane pe liniile magistrale;
- linii cu viteze mari ( $> 140$  km/h), adică linii speciale.

Din punct de vedere al frecvenței solicitărilor (intensitatea traficului) liniile de cale ferată se pot clasifica astfel:

- linii cu trafic redus ( $< 6$  mil. tone brute/an);
- linii cu trafic mediu (6... 15 mil. tone brute/an);
- linii cu trafic intens (15... 25 mil. tone brute/an);
- linii cu trafic foarte intens ( $> 25$  mil. tone brute/an).

Experiența îndelungată, de peste 170 de ani de la construcția primelor căi ferate, a permis să se aprecieze, în funcție de factorii analizați mai sus, care este durata după care deformațiile remanente depășesc limitele admise și sunt necesare lucrărilor de remediere, de întreținere și în același timp care este volumul acestor lucrări. Aceste aprecieri dau posibilitate administrațiilor de cale ferată să planifice lucrările de întreținere a căii.

Pentru a menține calea la parametrii proiectați (viteză, sarcină pe osie etc.) s-au conceput diferite sisteme de întreținere și reparație a căii. Există câteva principii care trebuie să stea la organizarea și planificarea acestor lucrări de întreținere:

- a) urmărirea, verificarea și măsurarea deformațiilor căii să se facă la perioadele corespunzătoare și cu mijloace adecvate pentru ca limitele admise ale deformațiilor să nu fie nici într-un caz depășite;
- b) programarea lucrărilor de remediere a deformațiilor să asigure executarea lucrărilor în timp util, pentru a nu se depăși limitele admise;
- c) perturbațiile în circulația trenurilor să fie cât mai mici, adică, în limita posibilităților, lucrările de întreținere să se execute fără închideri de linie, fără restricții de viteză;

- d) consumul de materiale și de forță de muncă să fie cât mai reduse;
- e) lucrările de întreținere să fie de calitate și fiabilitate corespunzătoare, astfel încât între două intervenții la cale să fie un interval cât mai mare;
- f) să se dea posibilitatea unei programări judicioase a lucrărilor de întreținere în scopul menținerii unui număr aproximativ constant de forță de muncă, asigurând posibilități de intervenție cu aceleași efective de oameni în toate anotimpurile;
- g) principiul prevenirii defectelor sau cel puțin reducerea lor, pentru a nu se ajunge la periclitarea parametrilor proiectați ale căii ferate, care este un principiu valabil și în alte domenii (mai ușor prevenim decât reparăm); lucrările de întreținere trebuie executate preventiv, defectul trebuie eliminat înainte de a ajunge la limita admisă, din care cauză organul de întreținere trebuie să știe să aprecieze din timp și corect starea căii, interpretând corect rezultatele măsurărilor efectuate la linie cu tiparul, căruciorul sau vagonul de măsurat calea, măsurători completate de ochiul, logica și gândirea și experiența inginerului de întreținere a căii ferate;
- h) se impune urmărirea unui cost cât mai redus și realizarea unei productivități cât mai ridicate prin mecanizarea lucrărilor.

Mecanizarea lucrărilor cu utilaje grele de cale are și alte consecințe. Astfel se reduce capacitatea de transport a liniei, deoarece o mașină ocupă calea și în acest timp pe linie nu se poate circula. De exemplu, o mașină de burat sau o mașină de ciuruit ocupă linia minim 3 ... 4 ore zilnic. Pentru aceasta trebuie să existe un interval disponibil în graficul de circulație al trenurilor sau linie dublă. Respectarea primei condiții este din ce în ce mai grea, deoarece calea ferată este din ce în ce mai solicitată. Orientarea ar fi spre linii duble de cale ferată. Liniile duble măresc foarte mult capacitatea de circulație, crește productivitatea mașinilor

grele de cale și calitatea lucrărilor de întreținere. Există posibilitatea de închidere a uneia din linii pentru circulația trenurilor și dirijarea circulației tuturor trenurilor pe cealaltă linie (în ambele sensuri).

### **3. Generalități despre mărimea deformațiilor și uzurilor căii și limitele admise**

Așa cum s-a arătat, calea ferată suferă o serie de deformații, din care o parte sunt remanente. Totodată sub efectul forțelor verticale și orizontale care acționează asupra căii ferate, elementele componente ale suprastructurii căii (șină, traverse, material mărunț etc.) se uzează. S-a mai arătat că între forma și dimensiunile căii și forma și dimensiunile vehiculului trebuie să fie o concordanță care să asigure susținerea și ghidarea vehiculului, realizarea forței de tracțiune și frânare, siguranța mărfurilor transportate și confortul călătorilor.

Calea ferată deformându-se și uzându-se în exploatare, deformațiile pot ajunge la mărimi care să nu mai permită utilizarea condițiilor de mai sus. Mărimile deformațiilor și uzurilor la care condițiile de mai sus nu sunt îndeplinite poartă denumirea de limite admise sau toleranțe admise.

Aceste limite (toleranțe) admise depind și de felul traficului ce se realizează pe calea respectivă în sensul că pe o cale ferată pe care se desfășoară numai trafic de mărfuri, limitele deformațiilor și uzurilor trebuie să asigure toate condițiile de mai sus exclusiv condiția de confort a călătorilor. Pe liniile pe care se desfășoară trafic mixt sau pe linii pe care se desfășoară numai trafic de călători (linii suburbane în orașe mari, chiar linii interurbane) trebuie să se asigure și condiția de confort a călătorilor.

În consecință toleranțele admise se vor clasifica după cele două aspecte arătate, adică:

- toleranțe de siguranță, care reprezintă limita deformațiilor la care sunt asigurate toate condițiile de siguranța circulației, dar nu în toate cazurile este asigurat și confortul călătorilor (linii cu trafic de marfă);
- toleranțe de confort, care reprezintă limita deformațiilor la care este asigurat în plus și confortul călătorilor (linii cu trafic mixt).

Toleranțele de confort sunt mai strânse, mai severe decât cele de siguranță.

Toleranțele de siguranță (limitele de siguranță) pot fi utilizate și la determinarea cauzelor unor evenimente de cale ferată.

Majoritatea administrațiilor feroviare nu diferențiază cele două tipuri de toleranțe. Astfel la CFR cele două categorii de limite sunt prezentate împreună în „Norme și toleranțe pentru construcția și întreținerea căii” (Instrucția 314 din 1989), fără a se face distincție între limitele de siguranță și cele de confort. Această prezentare duce la interpretări greșite în analiza cauzelor care au produs sau pot provoca evenimente de cale.

Determinarea toleranțelor admise are importanță și din punct de vedere economic, deoarece fixarea unor limite admise prea strânse poate conduce la creșterea nejustificată a cheltuielilor de întreținere.

Pentru stabilirea toleranțelor admise, există câteva criterii:

- criteriul economic;
- criteriul performanței;
- criteriul vitezei de circulație;
- criteriul capacității de circulație;
- criteriul caracteristicilor vehiculelor.

Criteriul economic se bazează pe ideea traficului specializat (călători sau marfă), urmărește condițiile de întreținere care sunt deosebite pentru transportul de marfă și pentru cel de persoane. În cazul traficului mixt, întreținerea trebuie rezolvată ca pentru traficul de călători, chiar dacă pentru călători sunt rezervate

doar 2 ... 3 perechi trenuri pe zi; lucrările de întreținere sunt în acest caz mai pretențioase, mai scumpe.

Criteriul performanței se desprinde din primul criteriu. Pentru a atrage călători, unele administrații de cale ferată au căutat să îmbunătățească parametrii de circulație (confort, viteză etc.). Pentru aceasta au fost construite vehicule de călători în corelare cu forma și dimensiunile căii pentru a se obține viteze sporite (>120 km/h) sau mari (>200 km/h), cu un grad de confort ridicat (de exemplu: vagoane cu auto-supraînălțare, automotoare cu centrul de greutate mai jos etc.) pentru a se putea spori viteza de circulație. Așa cum s-a mai arătat, se preconizează separarea căilor ferate pentru traficul de călători (de exemplu: Tokyo-Osaka, Paris-Lyon etc.).

Criteriul vitezei de circulație este de o importanță deosebită. Așa cum se știe, solicitarea căii ferate, eforturile și deformațiile cresc direct proporțional cu  $V^2$  sau chiar cu  $V^3$ . Deci limitele admise sunt foarte mici la viteze mari.

O problemă apărută în ultimii 25...30 de ani la cele mai multe administrații de cale ferată, este sporirea vitezei de circulație și limitele ei economice: costul întreținerii anuale a unei linii de mare viteză (>120km/h) față de costul întreținerii la aceeași cale ferată cu  $V=80$  km/h, este aproximativ dublu. Rezultă că în cazul în care efectele economice ale sporirii vitezei sunt suficient de mari pentru a justifica costurile sporite ale întreținerii, atunci este economic să se mărească viteza de circulație.

Rentabil și logic este ca viteza de circulație a trenurilor să nu fie sporită pentru două-trei trenuri pe zi, pentru că efectele economice sunt nesemnificative. În cazul sporirii vitezei de circulație la 25...30 perechi de trenuri pe zi, măsura este deja rentabilă.

Criteriul capacității de circulație este legat de criteriul precedent. Prin sporirea vitezei de circulație a trenurilor de marfă cu  $\approx 25\%$  sporește capacitatea de circulație cu  $\approx 25\%$ . Aceasta este o măsură rentabilă.

Criteriul caracteristicilor vehiculelor stabilește cele mai defavorabile caracteristici care impun cele mai necorespunzătoare condiții de circulație.

#### **4. Deformațiile căii în exploatare**

Așa cum s-a mai arătat, sub acțiunea sarcinilor verticale și orizontale, calea ferată se deformează elastic (adică reversibil) și plastic (deformații remanente). Dacă valoarea deformațiilor remanente depășește anumite valori (limite, toleranțe) calea nu poate fi proiectată la parametri proiectați decât după ce aceste deformații au fost înlăturate.

Cele mai frecvente deformații care apar în exploatare sunt:

- deformația ecartamentului;
- deriparea căii;
- deformațiile rosturilor de dilatație;
- denivelările căii ferate;
- deformații rezultate din defectele materialelor din suprastructurii căii;
- uzura materialelor.

În realitate deformațiile nu apar izolat ci ele se cumulează, apar mai multe feluri concomitent, uneori independente. De exemplu, în curbe se constată modificări ale ecartamentului, uzura șinei (în special pe firul exterior), deformații în plan vertical precum și deripări. În consecință cauzele, consecințele și modul de remediere al defectelor trebuie tratate împreună, ținând cont de interdependența între ele. Foarte rar se întâmplă ca pe un sector de linie să apară defecte izolate.

#### 4.1. Toleranțe admise la ecartament

Limita admisă (toleranța admisă) privind mărimea abaterii de la ecartamentul normal la lărgiri, la căile ferate în exploatare, este:

$$\varepsilon_{\max} \leq 10 \text{ mm} \quad (5.18)$$

Această toleranță admisă este valabilă la majoritatea administrațiilor de cale ferată ca limită de siguranță. Ea rezultă din relația dintre dimensiunile osiei montate și ale căii.

Bandajul are două înclinări (1:20 și 1:10) pentru ca să nu se producă prin uzuri șanțuri sau bavuri. Nu este permis să se circule cu înclinarea de 1:10, deci :

$$e+S+\varepsilon=1470 \text{ mm (ecartamentul maxim admis)} \quad (5.19)$$

Dar,  $S_{\max}=25 \text{ mm}$ , rezultând:

$$\varepsilon_{\max}=1470 - (1435+25)=10 \text{ [mm]} \quad (5.20)$$

Această toleranță reprezintă o limită de siguranță și nu de confort.

Ecartamentul mărit conduce la un mers șerpuit, incomod. Nu există limită de confort. Limitele de confort ar trebui să fie mai mici

$$\varepsilon_{\text{confort}} \ll 10 \text{ mm} \quad (5.21)$$

pentru ca vehiculele să nu aibă posibilitatea de deplasare laterală, călătorii să nu fie deplasați. În cazul în care s-ar respecta această toleranță (limită de confort) uzura șinei ar fi mai pronunțată și rezistențele la mers ar crește.

Pentru sporirea confortului, unele administrații de cale au redus limita de la 10 la 3 mm.

Toleranțele la îngustări ( $\varepsilon_{\min}$ ) ar fi:

$$\varepsilon_{\min}=1435-1426=9 \text{ [mm]} \quad (5.22)$$

Acceptând 9 mm toleranță ar însemna că vehiculele cu bandaje noi (fără uzuri) ar circula frecând cu ambele buze pe ciuperca șinelor, ducând la uzuri și rezistențe sporite. Din acest motiv  $\varepsilon_{\min}$  se limitează la 3 mm și deci:

$$e_{\min}=1435-3=1432 \text{ [mm]} \quad ( 5.23 )$$

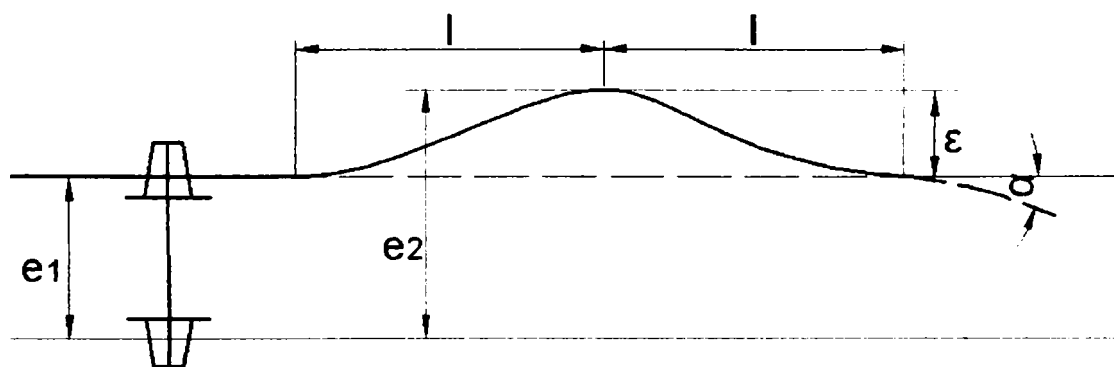
Această restricționare a limitei îngustării admise de la 9 la 3 mm nu conduce la un volum sporit de lucrări de întreținere, pentru că îngustările apar mai rar.

Ecartamentul deci nu trebuie să fie în nici un caz mai mare de 1470 și mai mic de 1432 mm.

În conformitate cu Instrucția de norme și toleranțe pentru construcția și întreținerea căii (Instrucția 314) toleranțele la ecartament sunt următoarele:

- la construcții și refacții de linii cu material nou  $-1...+4$  mm, față de  $1433+S$  mm, iar pe poduri metalice  $-1...+3$  mm față de  $1433+S$  mm;
- la construcții și refacții cu material semibun  $-3...+5$  mm față de  $1435+S$  mm, iar pe poduri metalice  $-3...+4$  mm față de  $1435+S$  mm;
- la liniile în exploatare în funcție de  $V_{\max}$  (față de  $1435+S$  mm),  $-3...+5$  mm pentru  $V_{\max} > 120$  km/h și  $-3...+10$  mm pentru  $V_{\max} \leq 120$  km/h;
- pe podurile metalice, la linii în exploatare, față de  $1435+S$  mm,  $-3...+5$  mm.

O importanță deosebită o are variația ecartamentului în lungul căii. Mărimile diferite ale ecartamentului căii în lung corespund deformației în plan a unei singure șine (fig. 5.5).



*Fig. 5.5. Variația ecartamentului*

Valoarea  $\varepsilon/l = \text{tg}\alpha$  este unghiul de atac al șinei de către buza bandajului.



Experimental s-a constatat că dacă se ia în considerare o uzură maximă a șinei (un unghi de 30 %), la un unghi de atac de 2 °, nu există pericol de urcare a buzei bandajului pe șină pentru  $V \leq 40$  km/h.

Rezultă că:

$$i_{\max \text{ siguranță}} = \operatorname{tg} \alpha = \varepsilon/l = \operatorname{tg} 2^\circ = 0,035 \quad (5.24)$$

adică o toleranță la înclinarea deformațiilor de 35 mm/m.

Limita de confort stabilită experimental este de  $\alpha = 33'$ . La acest unghi de atac, șocul pe care îl simte călătorul în momentul în care roata lovește șina, este acceptabil dacă viteza  $V \leq 40$  km/h. Rezultă:

$$i_{\max \text{ confort}} = 0,0096, \text{ adică } 9,6 \text{ mm/m}$$

Întrucât șocul crește proporțional cu pătratul vitezei (șocul fiind proporțional cu energia cinetică  $= mv^2/2$ ) la viteza de 80 km/h, deformația în lung poate fi – pentru asigurarea condiției de confort – de  $80^2/40^2 = 4$  ori mai mică.

Rezultă:

$$i_{\max \text{ confort}} = \frac{40^2}{80^2} \cdot 0,0096 = 0,0024, \text{ adică } 2,4 \text{ mm/m.} \quad (5.25)$$

La  $V = 120$  km/h:

$$i_{\max \text{ confort}} = \frac{40^2}{120^2} \cdot 0,0096 = 0,00106 \approx 1 \text{ mm/m} \quad (5.26)$$

Admițând că șocul crește cu pătratul vitezei, se pot accepta valorile din tabelul 5.1:

**Tabelul 5.1**

$V_{\max}$ [km/h] \ $i$ [mm/m]	40	80	100	120	160	200
$i_{\max \text{ sig.}}$	3,5	8,8	5,6	3,9	2,2	1,4
$i_{\max \text{ conf.}}$	9,6	2,4	1,5	1,0	0,6	0,38

Ecartamentul (implicit deformațiile ) se poate măsura cu precizie de 1mm, ca atare și unghiul de atac  $\alpha$  se poate măsura cu o precizie de 1 mm/m.

Cu vagonul de măsurat calea se poate măsura deformația și în fracțiuni de mm.

Instrucția 314 permite ca variația supralărgirii la linii noi și refacții cu material nou să se facă cu 1 mm/m, iar în exploatare aceasta va fi de maxim 2 mm/m. Excepție fac curbele după aparatele de cale unde această variație maximă este de 2 mm/m, respectiv 3 mm/m. Toleranțele la calea ferată pe poduri fără prismă de balastare la ecartament sunt de 1mm/m la linii noi sau refacționate (indiferent de material) și 2 mm/m la linii în exploatare.

La viteze mai mari ( $V > 120 \text{ km/h}$ ) problema variației ecartamentului devine foarte importantă deoarece șocurile transmise de buzele bandajelor fac călătoria foarte neplăcută și pot conduce la deformații în plan a căii (deripări) care pot deveni periculoase pentru siguranța circulației. În consecință la viteze mari se impun condiții severe : la montarea căii pe traverse de lemn sau de beton, exactitatea trebuie să fie de ordinul 0,25 mm/m. Respectarea acestei condiții la traversele de beton precomprimate este foarte grea, deoarece diferența de ecartament măsurată la două traverse consecutive poate ajunge la 7 mm (chiar 10... 12 mm) ceea ce poate conduce la un unghi de atac:

$$i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{7}{0.50} = 14 \text{ [mm/m]} \quad (5.27)$$

sau chiar :

$$i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{12}{0.50} = 24 \text{ [mm/m]} \quad (5.28)$$

depășind deci chiar limita de siguranță. Aceasta este foarte grav mai ales pe linii unde viteza de circulație este mare.

Din acest motiv pe liniile cu viteze sporite și mari se recomandă alegerea atentă a traverselor de beton armat, iar alte administrații de cale ferată preferă traverse bibloc.

Observații:

a) în curbele cu raze mici ( $R < 300\text{m}$ ) în care se produce frecvent uzura laterală a șinei pe firul exterior (se întâmplă și pe curbele cu  $R$  mai mare) datorită acestei uzuri ( $u$ ) ecartamentul crește cu „ $u$ ” fără ca șina să se miște în prinderi; această uzură „ $u$ ” poate fi mai mare de 10 mm, poate deci să fie depășită toleranța de 10 mm și apar probleme speciale de exploatare. Sunt posibile evenimente pentru că din neatenție această uzură poate să nu fie prinsă la tipar, iar buza bandajului poate să încalcece șina; dacă se limitează uzura la înălțimea buzei bandajului (27 mm) și înclinarea uzurii la maxim  $30^\circ$ , atunci valoarea uzurii măsurată la nivelul superior al ciupercii șinei este:

$$u_{\max} = 27 \text{ mm} \cdot \text{tg}30^\circ = 27 \cdot 0.577 = 15.5 \text{ mm} \quad (5.29)$$

b) în cazul îngustărilor, șocul apare indiferent de lungimea deformației.

#### **4.2. Toleranțe admise la deriparea căii**

Instrucția prevede limite (toleranțe) pentru diferența între două săgeți vecine, respectiv pentru diferența între săgeata maximă și minimă, așa cum sunt ele prezentate în tabelul 5.2.

Se menționează că toleranțele dintre săgețile vecine pe racordări reprezintă jumătate din valoarea dintre săgețile vecine aplicate pe curba circulară.

Toleranțele admise depind deci de viteza vehiculului, raza curbei și mărimea coardei. Viteza și raza intervine în calculul accelerației transversale care trebuie compensată prin supraînălțare și care este prevăzută prin construcție. Variind săgeata variază implicit și raza (curbura) și deci se modifică și condițiile

de stabilitate și confort; variațiile(abaterile) mari la săgeată reprezintă abateri la lipsa sau excesul de supraînălțare adică abateri la accelerația centrifugă necompensată( $\gamma$ ).

**Tabelul 5.2**

RAZELE CURBELOR [m]																	
$\leq 250$			251...350			351...575			576...1000			R>1000					
VITEZELE [m]																	
$\leq 30$	31	>50	$\leq 50$	51	$\leq 50$	51	81	$\leq 50$	51	81	101	>120	$\leq 50$	51	81	101	120
	-			-		-	-		-	-	-			-	-	-	-
	50			80		80	100		80	100	120			80	100	120	120
TOLERANȚE ÎNTRE SĂGETILE VECINE [m]																	
16	12	8	30	25	25	20	16	20	16	14	10	8	20	16	12	8	7
TOLERANȚE ÎNTRE SĂGETI MAXIME ȘI MINIME [m]																	
25	20	15	45	35	35	30	24	30	25	20	15	12	30	25	18	12	10

Se menționează că toleranțele dintre săgețile vecine pe racordări reprezintă jumătate din valoarea dintre săgețile vecine aplicate pe curba circulară.

Toleranțele admise depind deci de viteza vehiculului, raza curbei și mărimea coardei. Viteza și raza intervine în calculul accelerației transversale care trebuie compensată prin supraînălțare și care este prevăzută prin construcție. Variind săgeata variază implicit și raza (curbura) și deci se modifică și condițiile de stabilitate și confort; variațiile(abaterile) mari la săgeată reprezintă abateri la lipsa sau excesul de supraînălțare adică abateri la accelerația centrifugă necompensată( $\gamma$ ).

Pornind de la faptul că nu există cale ferată perfectă, că nici o curbă de cale ferată nu este ideală, deci nu are raza constantă pe cuprinsul curbei circulare, comparația săgeților reale nu se va face cu cele ideale, ci se compară săgeata maximă cu săgeata minimă. Șocurile ( $da_n/dt$ ) sunt date nu de diferența dintre  $f_{real}$  și  $f_{ideal}$  ci de diferența ( $f_{max} - f_{min}$ ).

Tot șoc apare și din cauza diferenței între două săgeți vecine. Dacă luăm ca exemplu toleranțe de 10 mm între două săgeți vecine pentru curba cu raza  $R=576... 1000$  m și  $V=101... 120$  km/h, înseamnă că de fapt:

$$\frac{10 \text{ mm}}{10 \text{ m}} = 1 \text{ mm/m}$$

este toleranța dată de Instrucția 314 pentru variația ecartamentului.

Toleranțele care depășesc această valoare pot fi periculoase dar numai la viteze mari, deoarece șocurile cresc exponențial cu viteza (cu  $V^2$  sau chiar  $V^3$ ). Pentru viteze mai mari deci ( $>120$  km/h) toleranțele din tabele ar putea fi și mai strânse.

Pe de altă parte, toleranțele din tabel scad o dată cu creșterea razei întrucât în exploatare este interesantă deformația totală (săgeata totală care este suma săgeții din construcție + săgeata din deformație), la raze mai mari am putea avea deformații la săgeți mai mari, pentru că săgeata la deformație este mai mică și deci suma nu ar fi periculoasă.

În privința unghiului de atac pentru sectoarele curbe se pot da următoarele indicații (fig 5.6).

Pentru simplificarea calculelor, se consideră că distanța între osiile vehiculului este dată de distanța între două măsurători, deci este de 10 m.

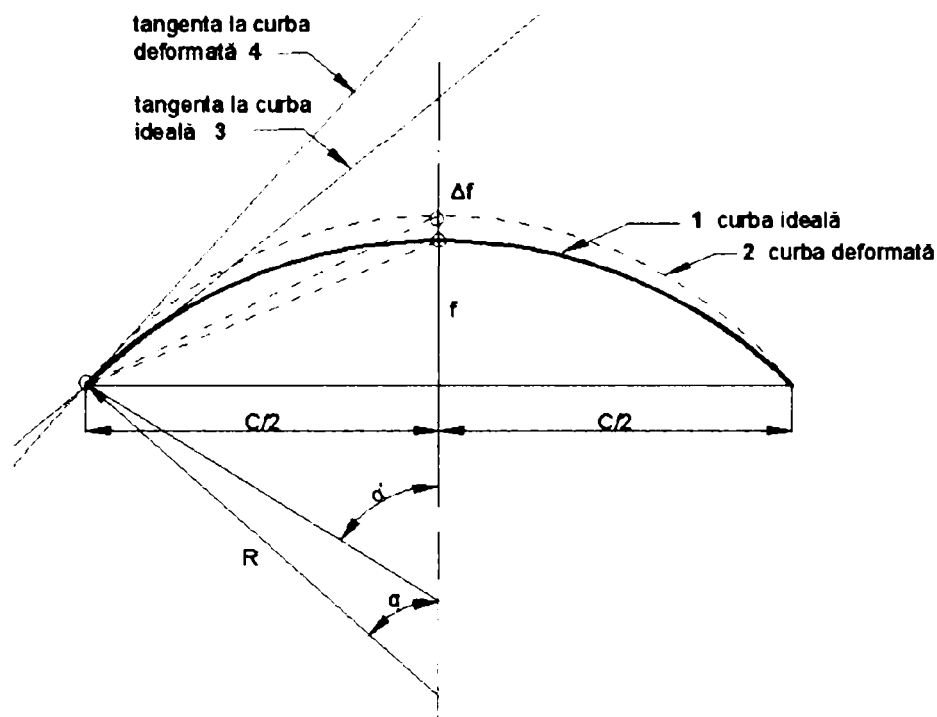
Unghiul de atac suplimentar din cauza deformației este ( $\alpha' - \alpha$ ):

$$\alpha' - \alpha = \text{tg } \alpha' - \text{tg } \alpha = \frac{4f'}{c} - \frac{4f}{c} = \frac{4}{c} \Delta f \quad (5.30)$$

deoarece:

$$\frac{\text{tg } \alpha}{2} = \frac{f}{c} = \frac{2f}{c} \rightarrow \text{tg } \alpha = \frac{4f}{c} \quad \text{și} \quad \text{tg } \alpha' = \frac{4f'}{c} \quad (5.31)$$

unde:  $f' = f + \Delta f$



**Fig. 5.6. Unghiul de atac în curbe**

Pentru coarda de 20 m se obține:

$$\alpha' - \alpha = \frac{1}{5} \Delta f \quad \text{sau} \quad \Delta f = 5(\alpha' - \alpha) \quad (5.32)$$

Importante nu sunt unghiurile  $\alpha'$  și  $\alpha$  ci diferența  $(\alpha' - \alpha)$  care determină valoarea unghiului de atac suplimentar din cauza deripărilor din curbă. Se observă că  $\alpha$  și  $f$  se calculează iar  $f'$  se măsoară. Pentru unghiul de atac  $(\alpha' - \alpha)$  se recomandă ca și în aliniament limite de confort și de siguranță (tabelul 5.3).

**Tabelul 5.3**

$V_{\max}$ [km/h]	Limite de siguranță	Limite de confort	Observații
40	$\alpha' - \alpha \leq 2^\circ$ $\text{tg}(\alpha' - \alpha) \leq 0,035$ $\Delta f \leq 0,175$	$\alpha' - \alpha \leq 33'$ $\text{tg}(\alpha' - \alpha) \leq 0,0096$ $\Delta f \leq 0,048$	Valori determinate experimental
80	$\alpha' - \alpha \leq 1^\circ 20'$ $\text{tg}(\alpha' - \alpha) \leq 0,024$ $\Delta f \leq 0,120$	$\alpha' - \alpha \leq 22'$ $\text{tg}(\alpha' - \alpha) \leq 0,0064$ $\Delta f \leq 0,032$	Pentru $V = 80 \text{ km/h}$ valorile reprezintă cca. 2/3 din valorile pentru $V = 40 \text{ km/h}$

### 4.3. Toleranțe la nivel longitudinal

Importantă este libertatea de mișcare pe verticală a osiei (sau a boghiului) față de șasiu. Este vorba de  $h_a$  (cursa arcurilor) și  $v_c$  (viteza de coborâre a roții sau a osiei).

În poziție statică  $h_{a\min} = 50$  mm

În mers  $h_{a\min}$  variază astfel:

- se mărește dacă roata sau osia coboară la lăsături;
- scade dacă roata sau osia urcă la cocoșe.

În legătură cu viteza de coborâre a osiei ( $v_{co}$ ) sau a roții ( $v_{cr}$ ) arată că osia, și fiecare roată în parte, sunt împinse de arcuri spre cale (de exemplu la o lăsătură) și este bine, pentru că trebuie ca toate roțile să fie tot timpul pe șine (să nu rămână suspendate) dar, din cauza inerției și a frecărilor, osia(sau roata) se deplasează în jos împinsă de arcuri cu o anumită viteză(nu instantaneu).

La majoritatea vehiculelor există o anumită  $v_{co}$  care se încadrează în valorile:

$$v_{co} = 0,08 \dots 0,14 \text{ m/s} \quad (5.33)$$

Excepție fac boghiurile CoCo (cu trei osii), unde:

$$v_{co} \approx 0,06 \text{ m/s} \quad (5.34)$$

Viteza de coborâre a roții (a unei singure roți) este mai mică ( $v_{cr} = 0,04 \dots 0,07$  m/s), adică:

$$v_{cr} \approx \frac{1}{2} \cdot v_{co} \quad (5.35)$$

deoarece roata care nu coboară împiedică, frânează coborârea celeilalte roți.

Observații:

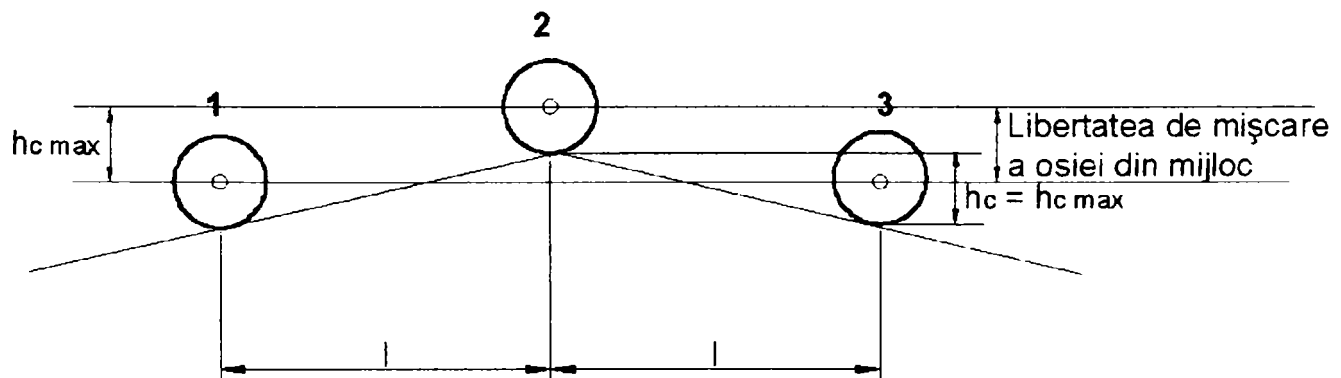
- $v_{cr}$  și  $v_{co}$  se modifică în exploatare, dar nu coboară sub 0,06 m/s, fapt important pentru întreținere din punct de vedere al denivelărilor. În calcule se va lua  $v_{cr}=v_{co}=0,06$  m/s.
- $v_{co}$  este importantă la denivelările longitudinale, iar  $v_{cr}$  este importantă la denivelările transversale (torsionări).

#### 4.3.1. Toleranțe la denivelări longitudinale (cocoșe și lăsături)

Cocoșele sunt mai periculoase. Ele nu apar prin ridicarea căii, ci apar între două lăsături învecinate, adică două denivelări învecinate duc la apariția unei cocoșe.

Limita de siguranță admisă la boghiul cu 3 osii este (fig 5.7)

$$h_{\max \text{ cocoasă}} < 50 \text{ mm} \quad (5.36)$$



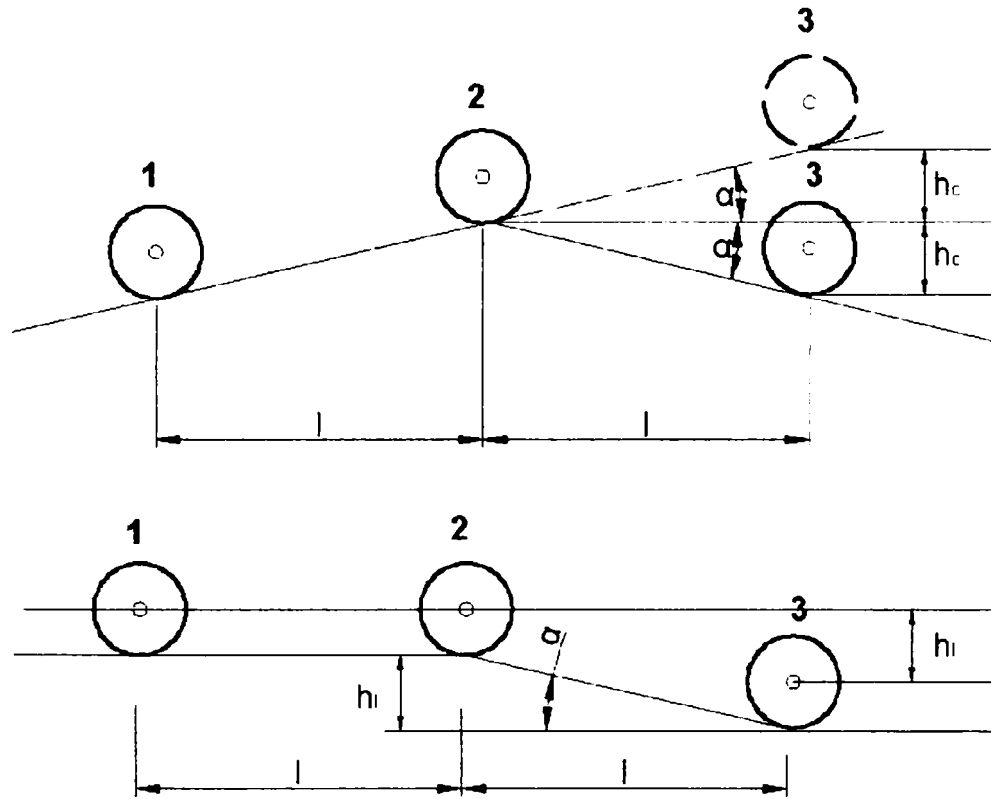
*Fig. 5.7. Circulația boghiului pe cocoșă*

Relația de mai sus rezultă din ipoteza că roata din mijloc(osia) consumă toată libertatea de mișcare a dispozitivului de suspensie ( $h_a$ ). Dacă cocoșa ar fi mai mare, cele două osii extreme ar balansa., respectiv s-ar ridica de pe șină.

A doua condiție se referă la racordarea cocoșei(problemă mai dificilă): coborârea osiei 3 (fig 5.8) cu distanța  $2h_c$  trebuie să se facă în timp ce vehiculul



parcure distanța 1, adică osia 3 ca să nu rămână suspendată după ce a părăsit vârful cocoșei. Ea trebuie să coboare proporțional cu înaintarea vehiculului.



*Fig. 5.8. Coborârea osiei pe cocoșă*

Rezultă că, în general, dacă osia trebuie să coboare cu  $h_c$ , avem:

$$i = \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{h_c}{l} = \frac{h_c}{t} : \frac{l}{t} = \frac{v_{\infty}}{v} \quad (5.37)$$

În cazul analizat, întrucât osia trebuie să coboare  $2h_c$  până când vehiculul a parcurs distanța  $l = 3 \text{ m}$ , rezultă condiția de racordare a cocoșei care este mai aspră: la viteza de coborâre, față de cazul general, trebuie să fie dublă, adică spațiul străbătut pe verticală să fie dublu ( $2h_c$ ):

$$\frac{v_{\infty}}{c} = \frac{2h_c}{l} = 2 \cdot \frac{h_c}{l} = 2i \quad (5.38)$$

Rezultă :

$$i \leq \frac{v_{co}}{2v} \quad ( 5.39 )$$

Pentru  $V=50$  km/h și  $v_{co}=0,06$  m/s :

$$i \leq \frac{0,06 \cdot 3,6}{2 \cdot V} = \frac{0,216}{2 \cdot 50} \approx \frac{1}{500} \quad ( 5.40 )$$

Condiția  $i \leq \frac{1}{500}$  înseamnă că lungimea pe care trebuie racordate cocoșele trebuie să fie egală cu cel puțin 500 de ori mărimea lor. La CFR condiția de racordare a cocoșelor pentru  $V \leq 50$  km/h este mai aspră și anume 1/600 în conformitate cu prevederile Instrucției 314. Pentru  $V=100$  km/h rezultă:

$$i \leq \frac{1}{1000}$$

Aceași Instrucție 314 pentru  $V > 50$  km/h prevede  $i \leq \frac{1}{2000}$ . Prin Instrucția 314 se delimitează și mărimea cocoșei la 10 mm ( $V \leq 50$  km/h) respectiv la 5 mm ( $V > 50$  km/h).

Prin limitarea distanței „ $h_c$ ” și racordarea ei prin „ $i$ ” este realizată și condiția de confort, pentru că aceasta este foarte puțin influențată de denivelările longitudinale. Singurul caz de amenințare a confortului ar fi dacă s-ar depăși cursa arcurilor (50 mm) și când cutia ar izbi pe osie („șoc”). De aceea confortul pretinde  $h_c \leq 25$  mm. De fapt și cei 50 mm pot fi dublați deoarece nu numai arcul roții 2 se comprimă ci se pot destinde și arcurile de la osiile 1 și 3.

Reglementările la CFR prevăd următoarele îngrădiri (acoperiri) pentru siguranța circulației:

- denivelări maxime mai mici de 10 mm (chiar 5 mm) față de  $h_{max}$  cocoșă = 50 mm;
- panta denivelării egală cu 1:600 (1:1200) în loc de 1:500 (1:100);

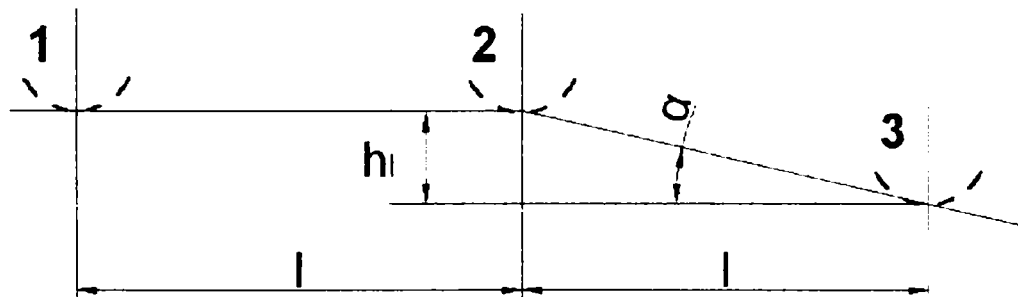
- $v_{co}$  se consideră egal cu  $v_{cr}$ , deși este dublu;
- lăsăturile se tratează ca și cocoșele deși condițiile de circulație sunt mult mai favorabile;

Mărimea lăsăturilor nu este limitată ( $h_l$ ) ca mărimea cocoșelor, deoarece destinderea arcurilor este posibilă mai mult decât comprimarea lor.

Condiția de racordare a lăsăturilor (fig 5.9) este :

$$i = \frac{h_l}{l} ; i \leq \frac{v_{co}}{v} \rightarrow i \leq \frac{0.216}{v} \quad (5.41)$$

$$\text{Deci la } V=50 \text{ km/h} \rightarrow i \leq \frac{1}{250} \quad (5.42)$$



*Fig. 5.9. Racordarea lăsăturilor*

$$\text{Iar la } V=100 \text{ km/h} \rightarrow i \leq \frac{1}{500} \quad (5.43)$$

Rezultă, așa cum era de așteptat, că restricțiile sunt ceva mai dulci. Totuși Instrucția 314 nu face deosebire, ci pretinde aceleași limite ca la cocoșă, considerându-se că pe lângă aceste valori nu se produc accelerații verticale în afara limitelor de confort.

Diferite administrații feroviare și-au fixat limitele în care pot apărea denivelările și racordările lor.

Totodată există și părerea că limita prevăzută a denivelării poate fi mai largă pentru o cocoșă și mai strânsă pentru lăsătură (deci invers) deoarece căderea osiei

produce șocuri mai puternice, mai mari, decât ridicarea ei din cauza modului de suspensie a vehiculelor de cale ferată.

Denivelările longitudinale trebuie tratate cu suficientă grijă pentru că în exploatare acestea pot deveni periculoase deoarece pot conduce (din cauza șocurilor) la ruperea unor elemente ale căii sau ale vehiculelor (șină, traverse, arcuri, etc.).

Măsurarea corectă a denivelărilor longitudinale se poate face numai cu vagonul de măsurat calea. Omul le poate verifica numai vizual, nu sub sarcină, cu instrumente topo, insuficient de precise. Denivelările longitudinale pot fi obținute prin:

- denivelarea șinei fără încărcare ( $h_s$ );
- lăsăturile oarbe ( $h_o$ ) formate din goluri ce se creează între șină și placa suport sau traversă, golul dintre placa suport și traversă, golul dintre traversă și piatra spartă; lăsăturile oarbe apar numai sub sarcină;
- lăsăturile elastice ( $h_e$ ) ale patului de balast și terasamentului care apar tot numai sub sarcină.

Denivelarea longitudinală totală se poate exprima astfel:

$$h_{\text{total}} = h_s + h_o + h_e \quad ( 5.44 )$$

Este necesar să se mai sublinieze că deformațiile în general, denivelările în special, nu sunt uniforme nici în lungul căii și nici chiar pentru aceeași traversă.

#### **4.3.2. Denivelări transversale**

Acestea sunt denivelările care apar în același profil transversal. Practic, întotdeauna apar aceste deformații.

În curbe, chiar prin construcție, firul exterior este supraînălțat (denivelat) față de firul interior.

Mentținerea nivelului transversal al căii între anumite limite reprezintă o problemă importantă a întreținerii căii.

După cum se știe există:

- sectoare de cale în aliniament (și chiar unele în curbe) fără supraînălțări;
- sectoare de cale în curbă cu  $h=\text{constant}$  (de ex. curbe circulare);
- sectoare de cale în curbă cu  $h=\text{variabil}$  (rampa supraînălțării).

#### **4.3.2.1. Denivelări transversale în aliniament**

În aliniament se pot întâlni:

- denivelări transversale simple;
- denivelări încrucișate.

##### **A. Denivelări transversale simple**

Din punct de vedere al mărimilor denivelărilor simple, acestea nu pot amenința securitatea circulației decât în măsura în care lășăturile pot micșora încărcarea pe un fir de șină. Această descărcare, asociată cu forțe orizontale mari pot eventual conduce la deraieri, mai ales în cazul șinelor uzate.

Pentru a evita această situație, este necesar ca suma forțelor orizontale statice și dinamice reale dezvoltate de vehicul la nivelul buzei bandajului ( $H_r$ ), să fie mai mică decât valoarea  $H_a$  numită „capacitatea de ghidare a osiei”. Pentru determinarea acestei capacități se pot face mai multe ipoteze.

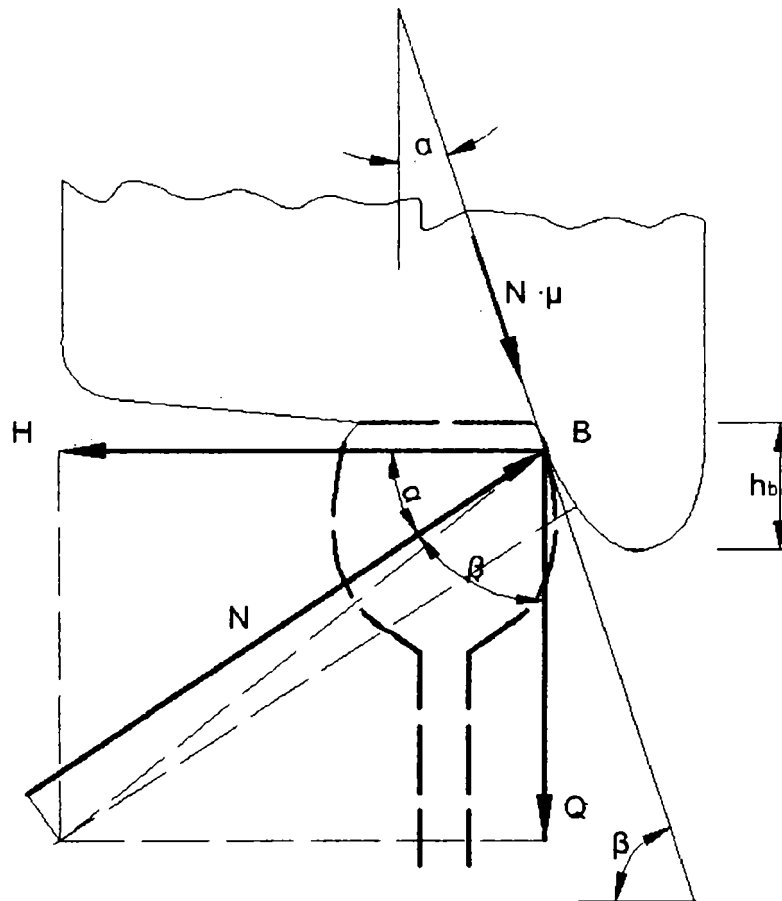
##### Ipoteza 1

Roata, respectiv bandajul, alunecă peste ciuperca șinei, depășind rezistența de frecare dintre șină și bandaj ( $N \cdot \mu$ ), dirijată, evident, în sens invers mișcării.

Mișcarea este posibilă după direcția tangentei la suprafața de contact între roată și ciuperca șinei și se produce cu atât mai ușor cu cât această suprafață este mai înclinată, adică unghiul  $\alpha$  mai mare (în cazul șinelor uzate de exemplu). Acțiunilor  $Q$  (suma forțelor verticale transmise de roată) și  $H$  (forțele orizontale) li se opun, ca reacțiuni: o forță orizontală  $N$  (fig 5.10) și una tangențială ( $N \cdot \mu$ ) din cauza frecării. La limita echilibrului, va trebui ca forța tangențială, rezultată în direcția mișcării să fie mai mică decât  $N \cdot \mu$ , adică:

$$H \cdot \cos \beta - Q \cdot \sin \beta \leq \mu (H \cdot \sin \beta + Q \cdot \cos \beta) \quad (5.45)$$

$$H \leq Q \frac{\sin \beta + \mu \cdot \cos \beta}{\cos \beta - \mu \cdot \sin \beta} = Q \cdot \frac{\mu + \operatorname{tg} \beta}{1 - \mu \cdot \operatorname{tg} \beta} \quad (5.46)$$



*Fig. 5.10. Capacitatea de ghidare în ipoteza 1*

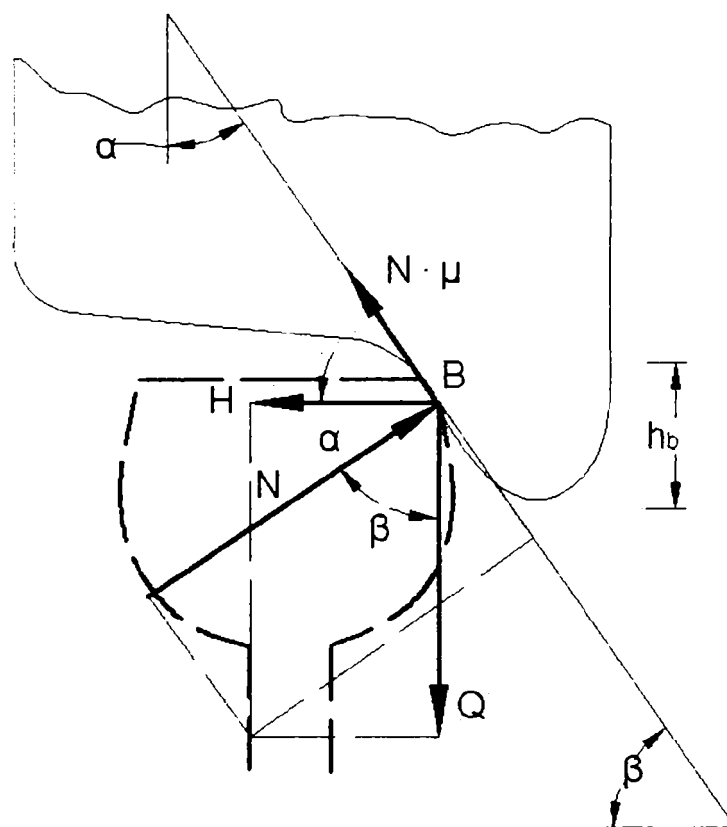
Această condiție este ușor de îndeplinit deoarece, chiar pe lângă o frecare nulă, echilibrul este asigurat pe lângă  $\left(\frac{H}{Q}\right)_{cr} \leq \text{tg}\beta$ .

În conformitate cu prevederile instrucționale, valoarea minimă a unghiului  $\beta$ , în cazul șinelor uzate este  $60^\circ$ , deci pentru  $\mu=0$  se obține:

$$\left(\frac{H}{Q}\right)_{cr} \leq \text{tg}60^\circ = 1.73 \quad (5.47)$$

Echilibrul este amenințat numai dacă din cauza lăsăturilor roata rămâne suspendată,  $Q$  scade forțele mult și  $H \geq 2Q$ .

### Ipoteza 2



**Fig. 5.11.** Capacitatea de ghidare în ipoteza a 2-a

Situația poate să devină critică atunci când, forța  $H$  crescând și ridicând roata pe fața laterală a ciupercii șinei, forța  $Q$  nu mai este capabilă să o coboare din cauza frecării; de data aceasta, frecarea are sens contrar și lucrează în defavoarea stabilității. În această ipoteză se utilizează relația stabilită de Nadal, care ia în considerare pentru sarcina pe roată aceeași încărcare verticală  $Q$ , forța orizontală  $H$ , reacțiunea  $N$  a șinei și frecarea bandajului cu șina ( $\mu \cdot N$ ), (fig. 5.11).

Considerând contactul teoretic numai în punctul B, datorită reacțiunii  $N$  care este înclinată din cauza forțelor orizontale  $H$ , roata are tendința să urce pe șină, sarcina verticală  $Q$  însă caută să coboare roata ceea ce dă naștere la o forță de frecare  $N \cdot \mu$ . Pentru a evita deraierea, această forță trebuie să se echilibreze, cu alte cuvinte, acțiunilor  $Q$  și  $H$  li se opun reacțiunile  $N$  și  $N \cdot \mu$ ; întrucât raportul dintre aceste reacțiuni este constant, pentru a evita deraierea, nici raportul între reacțiunile  $N$  și  $Q$  nu poate depăși o anumită valoare. Condiția de echilibru se poate scrie astfel:

$$Q \cdot \cos \beta + H \cdot \sin \beta - N = 0 \quad (5.48)$$

$$Q \cdot \sin \beta - H \cdot \cos \beta - N \cdot \mu = 0 \quad (5.49)$$

de unde:

$$H = \frac{Q(\sin \beta - \mu \cos \beta)}{\mu \cdot \sin \beta + \cos \beta} \quad (5.50)$$

Pentru a evita deraierea roții, trebuie ca:

$$N \leq Q \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \beta} \quad (5.51)$$

Pentru  $\beta=60^\circ$  se obține:

$$\frac{H}{Q} \leq \frac{1.73 - \mu}{1 + 1.73\mu} \quad (5.52)$$

Se consideră că pentru valori sporite ale coeficientului de frecare  $\mu$ , condiția de echilibru este mai greu de realizat.



Astfel, pentru  $\beta=60^\circ$  și  $\mu=0,35$  se obține:

$$H \leq 0.85 \cdot Q \quad (5.53)$$

iar, pentru  $\beta=60^\circ$  și  $\mu=0$ , se obține:

$$H \leq 1.73 \cdot Q \quad (5.54)$$

Forțele orizontale (H) se determină prin măsurători directe sau prin intermediul unor formule aproximative. O astfel de formulă a fost stabilită de Nadal:

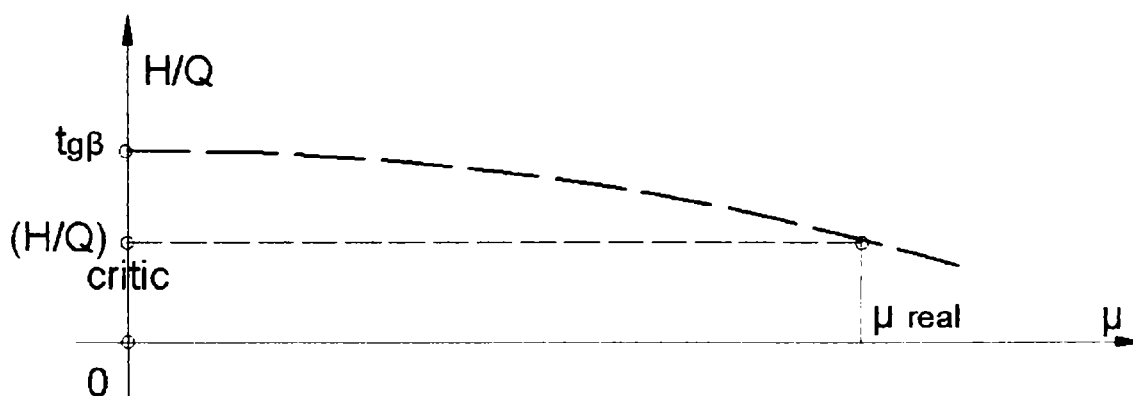
$$H = \frac{1}{3} \cdot Q + 10 \text{ [kN]} \quad (5.55)$$

Din această relație rezultă că pentru  $Q=125 \text{ kN}$

Se obține :

$$H=51,7 \text{ kN} \approx 0.4 \cdot Q \quad (5.56)$$

Variația raportului critic ( $H/Q$ ) este prezentat în figura 5.12 în funcție de coeficientul de frecare  $\mu$ .



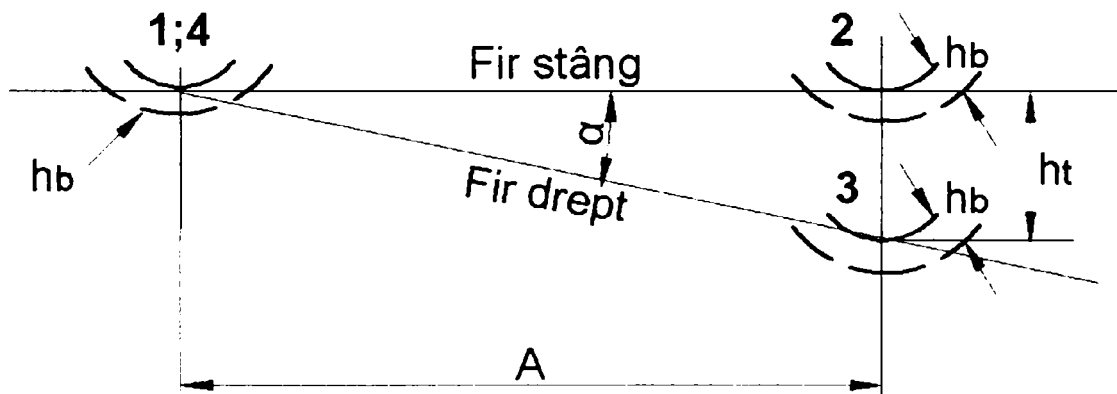
*Fig. 5.12. Variația raportului  $H/Q$*

Ridicarea buzei bandajului pe ciuperca șinei nu poate să apară decât în cazul unor situații speciale (lăsături în cale, pe rampa supraînălțării, etc.), echivalente cu o mișcare substanțială instantanee a sarcinii verticale Q (eventual anulare) și când roata nu-și poate relua poziția normală pe șină din cauza frecărilor mari (posibile

din cauza uzurii bandajului și șinelor) și a forțelor  $Q$  mici. Dacă aceste evenimente: roată ridicată pe ciuperca șinei (sau lăsătură pe un fir al căii) sarcină verticală redusă și coeficient de frecare sporite se asociază cu forțe horizontale ( $H$ ) sporite, escaladarea șinei de pe buza bandajului și deci deraierea, sunt posibile.

### Ipoteza 3

Se consideră cazul unui vagon cu două osii (sau al unui boghiu) cu ampatamentul  $A$  (fig 5.13).



**Fig. 5.13.** Capacitatea de ghidare în ipoteza a 3-a

Pericolul deraierii apare din cauza unghiului de denivelare dacă:

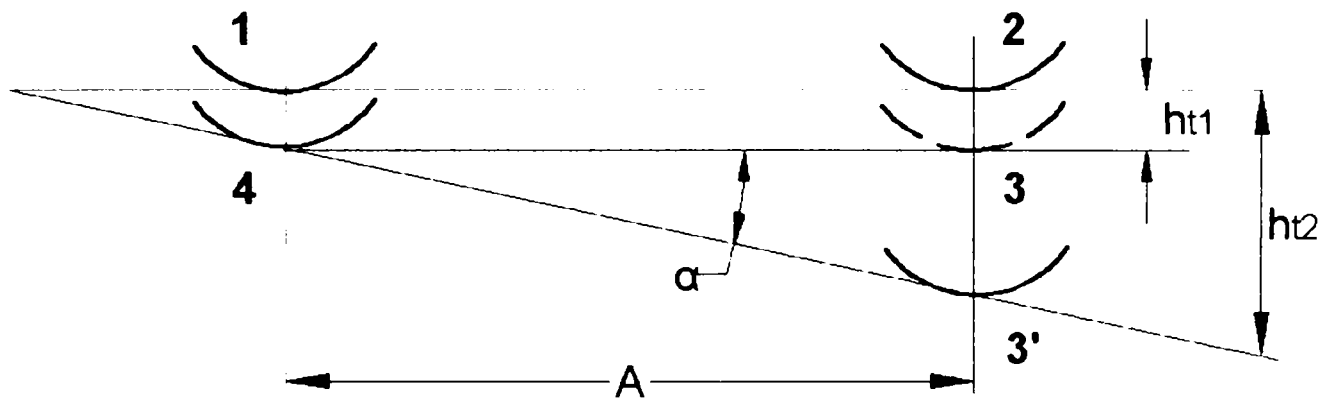
$$h_t > h_b \quad (5.57)$$

În ipoteza că roata 3 nu coboară cu  $h_t$ , sau dacă  $h_{t2} - h_{t1} > h_b$  (fig 5.14) rezultă că panta  $i_{cr}$  (periculoasă, critică) este:

$$i = \frac{h_{t2} - h_{t1}}{A} > \frac{h_{b \min}}{A_{\max}} ; i_{cr} = \frac{h_{b \min}}{A_{\max}} \quad (5.58)$$

Pentru siguranță se consideră că vehiculul nu cedează deci: viteza de coborâre a roții 3 este nulă ( $v_{co}=0$ ), iar  $A_{\max} = 12$  m, rezultând:

$$i_{cr} = \frac{h_{b \min}}{A_{\max}} = \frac{26 \text{ mm}}{12 \text{ m}} \approx \frac{1}{460} \quad (5.59)$$



*Fig. 5.14. Panta critică*

#### Ipoteza 4

Pericolul, în ipoteza precedentă, este diminuat pentru că sistemul de rulare este legat de șasiu prin arcuri care permit denivelări, de aceea hotărâtor este calculul cinematic, adică viteza de coborâre a roții, pentru a urmări denivelările căii ( $v_{co} = 0,06 \text{ m/s}$ ).

$$i \leq \frac{h_{t2} - h_{t1}}{A} = \frac{v_{co}}{v} = \frac{3.6 \cdot v_{co}}{V} = \frac{3.6 \cdot 0.06}{V} = \frac{0.216}{V} \quad (5.60)$$

Aceasta reprezintă limita de siguranță privind racordarea denivelării.

Înlocuind pe  $v$  cu diferite valori se obține panta critică a denivelării, astfel:

$$\text{- pentru } V=50 \text{ km/h, } i \leq \frac{0.216}{50} = \frac{1}{230}; \quad (5.61)$$

$$\text{- pentru } V=100 \text{ km/h, } i \leq \frac{0.216}{100} = \frac{1}{460}; \quad (5.62)$$

$$\text{- pentru } V=120 \text{ km/h, } i \leq \frac{0.216}{120} = \frac{1}{555}; \quad (5.63)$$

$$\text{- pentru } V=140 \text{ km/h, } i \leq \frac{0.216}{140} = \frac{1}{650}; \quad (5.64)$$

**Limita de confort a denivelărilor transversale** rezultă din condiția limită dată de accelerația transversală necompensată. În aliniament sau în curbe fără supraînălțări, dacă apar denivelări, accelerația transversală ar putea depăși valoarea  $0,6 \text{ m/sec}^2$  (valoare admisă). Această condiție este foarte ușoară pentru că ea ar conduce la denivelări admise de până la 90 mm (corespunzătoare accelerației de  $0,6 \text{ m/sec}^2$ ), denivelări care nu se întâlnesc în practică.

Normele CFR, respectiv Instrucția 314 din 1989, prevăd valori foarte rigide, fără a specifica dacă sunt de siguranță sau de confort. Toleranțele admise la nivelul căii sunt cuprinse în articolul 7 al Instrucției 314, care prevede următoarele:

Toleranțele la nivelul transversal prescris al unui fir față de celălalt atât în aliniament cât și în curbă sunt:

- 10 mm la liniile cu  $V_{\max} \leq 50 \text{ km/h}$  cu condiția ca variația nivelului în limitele acestor toleranțe să se întindă uniform pe distanța de cel puțin 600 de ori valoarea abaterii (adică  $i \leq 1/600$ );
- 5 mm la liniile cu  $V_{\max} > 50 \text{ km/h}$  cu condiția ca variația nivelului în limitele acestor toleranțe să se întindă uniform pe distanța de cel puțin 1200 de ori valoarea abaterii (adică  $i \leq 1/1200$ ).

Aceeași Instrucție admite rampe care racordează denivelarea (torsionarea căii măsurată pe bază de 2,5 m) valorile în tabelul 5.4.

Diferențele care apar între valorile din tabelul de mai sus și valorile  $i_{\text{adm}}$  calculate anterior provin din valoarea dată lui  $v_{\text{cr}} = 0,06 \text{ m/s}$ , viteză mult mai mică decât o au în realitate marea majoritate a vehiculelor feroviare.

Torsionarea căii este un defect local și reprezintă diferența de nivel transversal între cele două fire ale căii, măsurate în două puncte consecutive aflate la distanța „L” între ele, distanță denumită bază longitudinală de măsurare a

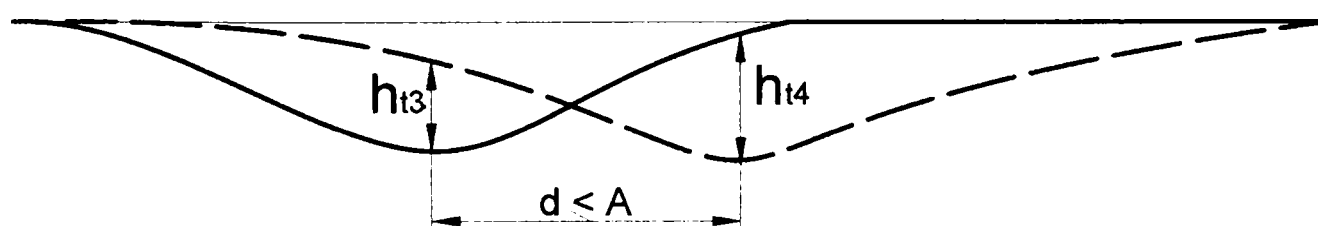
torsionării căii. La CFR în prezent se utilizează baza longitudinală de măsurare a torsionării căii  $L=2,5$  m.

**Tabelul 5.4**

Viteza de circulație km/h	Valoarea torsionării	Înclinarea rampei defectului
$V \leq 10$	15	1:166
$10 < V \leq 30$	12,5	1:200
$30 < V \leq 50$	10	1:250
$50 < V \leq 80$	9	1:275
$80 < V \leq 100$	7,5	1:300
$100 < V \leq 120$	6,5	1:400
$V > 120$	5,5	1:450

### B. Denivelările încrucișate

Acestea sunt denivelările consecutive în sens invers (alternative) și la distanță mai mică de 12 m care este ampatamentul maxim al vehiculelor feroviare (fig 5.15).



*Fig. 5.15. Denivelări încrucișate*

Aceste denivelări sunt periculoase deoarece torsionarea la care este supus vehiculul este dată de suma celor două denivelări și nu de diferența lor, adică:

$$i_{cr} = \frac{h_{t1} + h_{t2}}{A} \geq \frac{h_b}{A_{min}} = \frac{26 \text{ mm}}{7 \text{ m}} \approx \frac{1}{270} \quad (5.65)$$

Se reamintește că :  $A_{min}=7 \text{ m}$ , iar  $A_{max}=12 \text{ m}$

Pentru siguranță :

$$i = \frac{h_{t1} + h_{t2}}{l} \leq \frac{h_b}{A_{min}} = \frac{26 \text{ mm}}{12000 \text{ mm}} \approx \frac{1}{460} \quad (5.66)$$

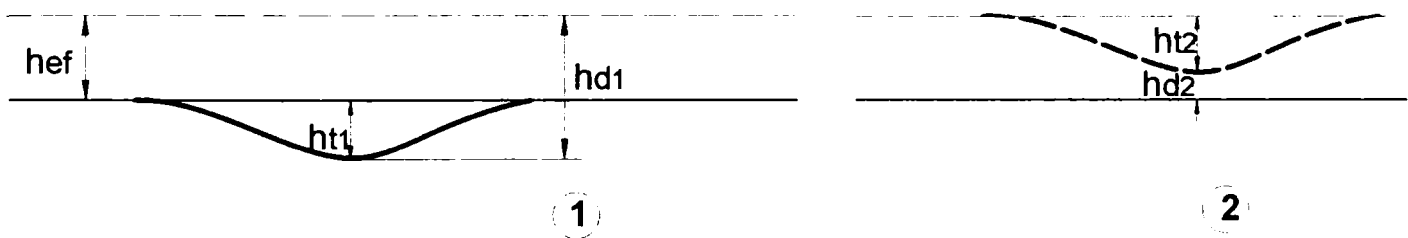
În condiții cinematice, pentru viteza  $V=50 \text{ km/h}$ , se obține:

$$i_c \frac{h_{t1} + h_{t2}}{l} \leq \frac{1}{230} \quad (5.67)$$

Pornind de la ideea că denivelări există oricum, important este ca rampa acestora să fie sub cea admisă, iar dacă sunt pe fire diferite, să fie la  $d > 12 \text{ m}$ . Rampa de racordare a denivelărilor trebuie să fie mai mică decât valoarea critică (limită) stabilită în Instrucția 314.

#### 4.3.2.2. Denivelări transversale în curba arc de cerc

Din punct de vedere al mărimii denivelărilor există limite rezultate tot din accelerația transversală neechilibrată. În principal se pot ivi următoarele două cazuri (fig 5.16).



**Fig. 5.16.** Denivelări transversale în curba arc de cerc

### Cazul 1

Notând cu  $h_d$  supraînălțarea în dreptul denivelării ( $h_d=h_{ef}+h_t$ ), rezultă:

$$h_d=h_{ef}+h_t \quad ( 5.68 )$$

Este posibil ca  $h_d=h_{ef}+h_t > h_{\max \text{ admis}}$  și în acest caz poate fi depășită limita de confort dată experimental pentru accelerația transversală necompensată ( $0,6 \dots 0,9 \text{ m/s}^2$ ). Trebuie ca:

$$h_{d1 \max} < h_{\max} = 150 \text{ mm} \quad ( 5.69 )$$

### Cazul 2

$$h_{d2}=h_{ef}-h_{t2} \quad ( 5.70 )$$

Este posibil ca  $h_{d2} < h_{\min \text{ admis}}$ .

În conformitate cu Instrucția 314, valoarea minimă a supraînălțării este:

$$h_{\min}=h_n=11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - I \quad ( 5.71 )$$

unde:

- $V$  este viteza maximă a trenurilor, în km/h;
- $R$  raza curbei în m;
- $I$  insuficiența de supraînălțare, în mm, și este exprimată cu relația

$$I = \frac{150}{1+S} \cdot \gamma_t \quad ( 5.72 )$$

în care :

- $S$  este coeficientul de suplețe al vehiculelor care are valoarea maximă de 0,4 după UIC;
- $\gamma_t$  accelerația transversală necompensată, în  $\text{m/s}^2$ .

La CFR insuficiența (lipsa) de supraînălțare care stă la baza determinării supraînălțării normale are valoare  $I=70 \text{ mm}$ , pentru  $S=0,4$  și  $\gamma_t=0,65 \text{ m/s}^2$ .

În cazuri excepționale se poate admite o insuficiență de supraînălțare  $I=90$  mm pentru  $S=0,4$  și  $\gamma_t=0,85$  m/s<sup>2</sup>.

Condiția de confort este satisfăcută dacă:

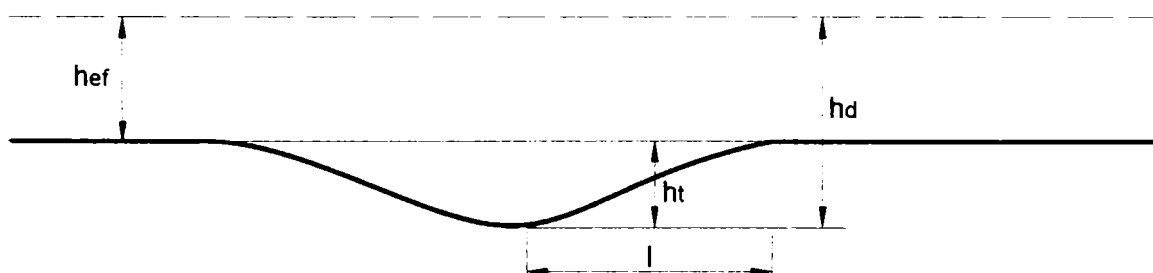
$$h_{d2} > h_{\min} = h_n = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - I \quad (5.73)$$

Condițiile de mai sus sunt amenințate atunci când :

$$h_{ef} = h_{\max} \text{ sau } h_{ef} = h_{\min} \quad (5.74)$$

pentru că în aceste cazuri denivelările ( $h_{t1}$  sau  $h_{t2}$ ) conduc la depășirea valorilor limită pentru supraînălțări ( $h_{\max}$  sau  $h_{\min}$ )

Din punct de vedere al racordării denivelărilor, pentru siguranță, se aplică aceleași condiții ca în aliniament (fig 5.17).



**Fig. 5.17.** Racordarea denivelărilor pe curba de arc de cerc

$$\frac{h_d - h_{ef}}{l} = \frac{h_t}{l} \leq \frac{0.216}{V} \quad (5.75)$$

Se menționează situația specială a curbelor fără supraînălțări când denivelarea firului exterior sub nivelul firului interior devine foarte periculoasă. Se știe că în curbă există 3 factori importanți care pot conduce la deraieri:

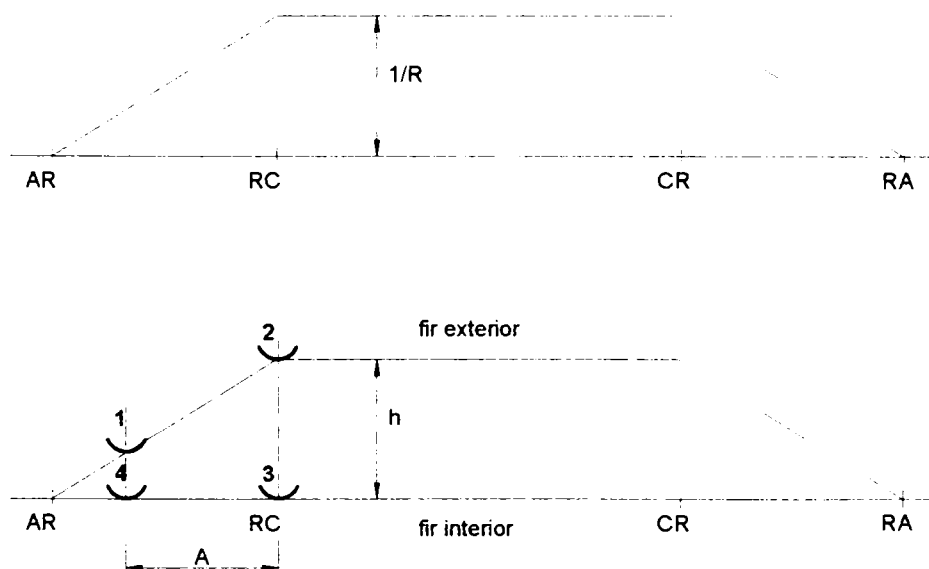
- a) unghiul de atac, rezultat din înscrierea vehiculului în curbă, care poate favoriza urcarea buzei bandajului pe firul exterior;
- b) forța centrifugă tinde și ea să ridice buza bandajului pe coroana șinei;
- c) uzura laterală a șinelor, mai accentuată pe firul exterior;



Rezultă că firul exterior nu trebuie să coboare în nici un caz sub nivelul firului interior. Pentru a nu exista acest pericol este indicată o supraînălțare constructivă de cca 15 mm, chiar dacă din calcule nu rezultă necesitatea realizării ei.

#### 4.3.2.3. Denivelări transversale pe rampa supraînălțării

Rampa supraînălțării depinde de mărimea supraînălțării ( $h$ ) și de viteza de circulație ( $V$ ) având înclinare mai mică (dată prin proiectare) decât cea precedentă în cazul racordării denivelărilor.

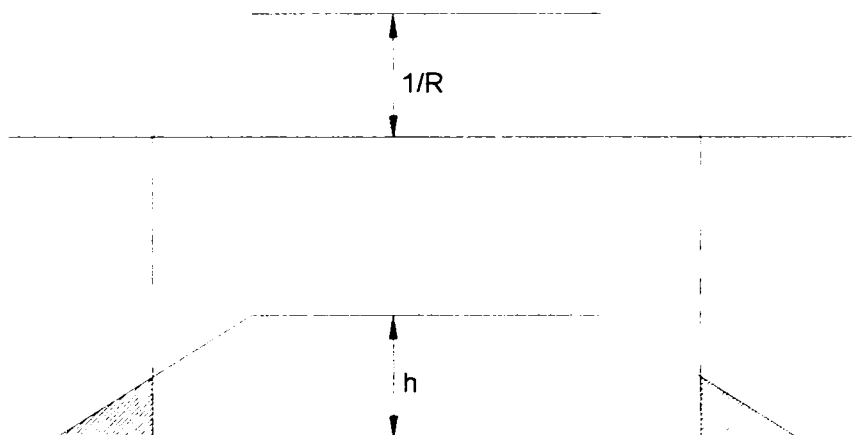


**Fig. 5.18.** Torsionarea pe o rampă ideală

Pe aceste sectoare problema denivelărilor este deosebită față de restul porțiunilor, prezentate anterior, în sensul că denivelările pe aceste porțiuni pot conduce la depășirea limitelor admise, pentru că din construcție există deja o torsionare a căii. Este adevărat că în general, rampa supraînălțărilor este mai mică decât rampa limită a denivelărilor dar, în unele curbe, tot din motive constructive, neputându-se construi curbe de racordare în plan, rampa racordării nu concordă cu

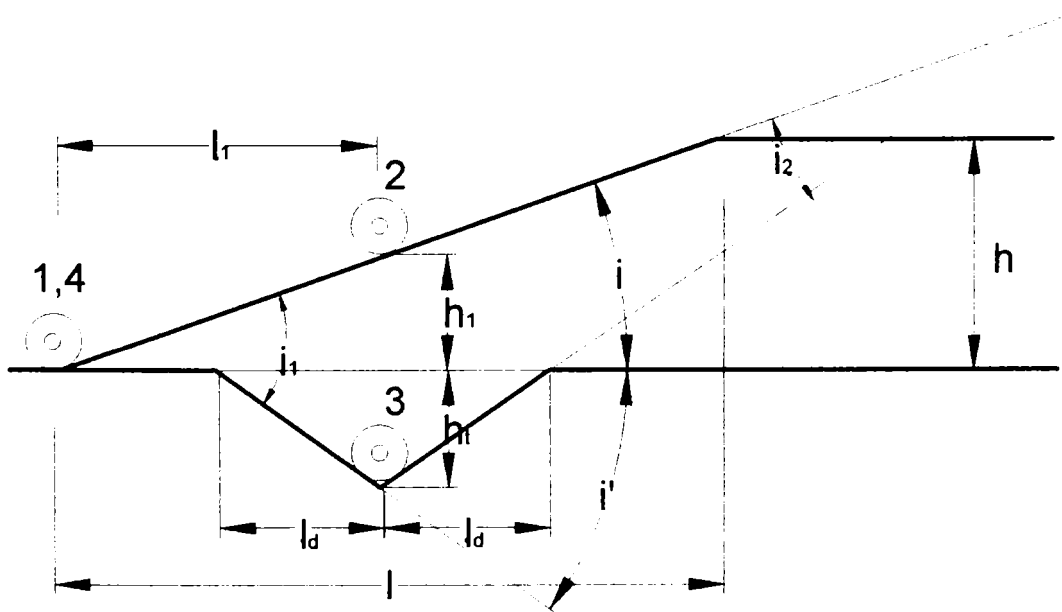
variația curburii, deci denivelările pe aceste porțiuni pot conduce la accelerații care să depășească limitele de confort. Astfel, în cazurile obișnuite, pe rampa supraînălțării există prin construcție o torsionare care prin denivelare se accentuează(fig 5.18).

În cazurile speciale, pe sectoarele cu supraînălțare ( $h$ ) și cu racordări prea scurte, există deja o accelerație necompensată, accentuată prin apariția denivelărilor(fig 5.19).



**Fig. 5.19.** Cazul curbelor cu racordări prea scurte

a) Denivelare pe firul interior (fig 5.20)



**Fig. 5.20.** Denivelare pe firul interior al rampei

$$i = \frac{h}{l} \quad (5.76)$$

$$i_1 = \frac{h_1 + h_t}{l_1} = i + i' ; i' = \frac{h_t}{hl_d} = \text{surplus de înclinare} \quad (5.77)$$

La ieșire din declivitate (lăsătură pe firul interior):  $i_2 = i - i'$

Limitele admise sunt aceleași ca și în cazurile analizate:

$$i \leq \frac{0,216}{V} = \frac{1}{230} \quad (\text{pentru } V=50 \text{ km/h}) \quad (5.78)$$

$$i_1 = i + \frac{h_t}{l_d} = \frac{1}{600} + i' \leq \frac{1}{230} \quad (5.79)$$

Exemplu :

Pentru  $i = i' = \frac{1}{600}$ ;  $i_1 = \frac{1}{600} + \frac{1}{600} = \frac{1}{300}$ , bun pentru 50 km/h, dar  
necorespunzător pentru  $V=100\text{km/h}$  ( $i_{\text{admis}} = \frac{1}{400}$ , sau pentru  
 $V > 100\text{km/h} \rightarrow i_{\text{admis}} < \frac{1}{300}$ ).

Rezultă că, întrucât denivelarea pe rampa supraînălțării poate conduce la o sporire a înclinării peste limitele admise, limitele denivelărilor (a racordării acestora) pe rampa supraînălțării sunt mai mici ca cele în aliniament sau de pe sectoarele cu  $h = \text{constant}$ , fiind egale cu diferența dintre denivelarea admisă ( $i_{\text{adm}}$ ) și  $i_{\text{ef}}$  din construcție, adică:

$$i' = i_{\text{adm}} - i_{\text{efectiv}} \quad (5.80)$$

unde:

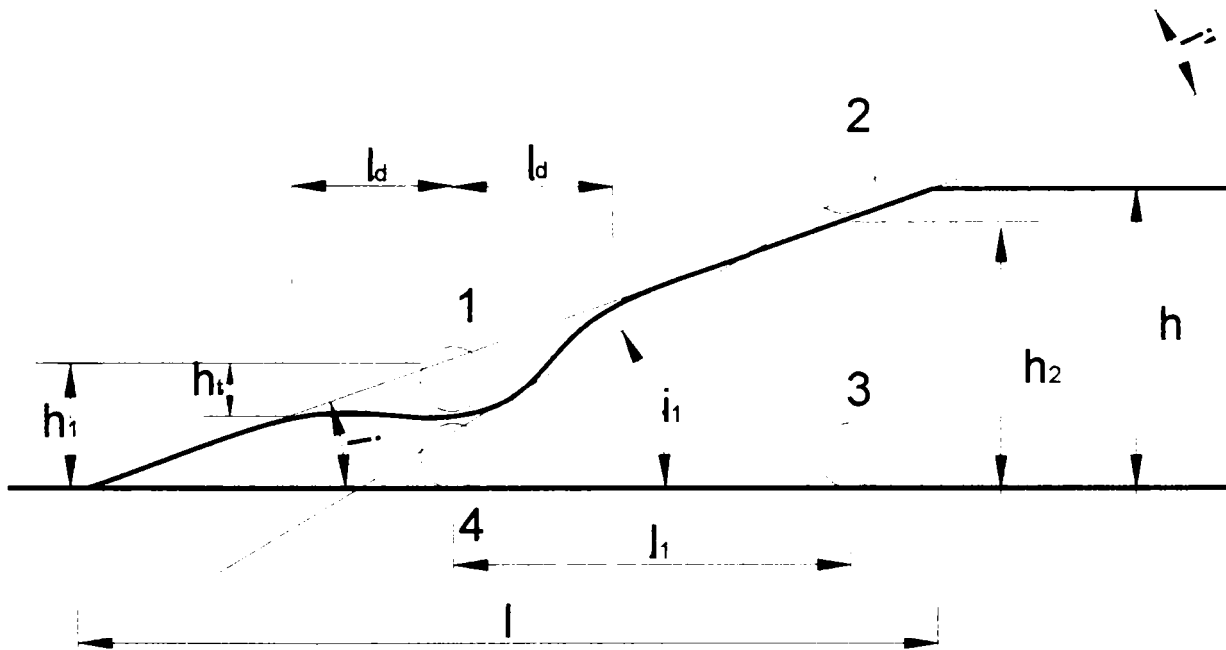
$$i_{\text{admis}} = \frac{0,216}{V} \quad (5.81)$$

De exemplu pentru  $V=100 \text{ km/h}$

$$i_{\text{admis}} = \frac{1}{460} \quad (5.82)$$

$$i_{\text{efectiv}} = \frac{1}{600} \rightarrow i' = \frac{1}{460} - \frac{1}{600} \approx \frac{1}{2000} \quad (5.83)$$

Denivelare pe firul exterior (fig. 5.21)



*Fig. 5.21. Denivelare pe firul exterior al rampei*

Torsionarea este dată de denivelarea totală:

$$i_1 = i + i' = \frac{h_2 - h_1}{l_1} + \frac{h_t}{l_d} \quad (5.84)$$

adică, se repetă fenomenul anterior.

Se admite ca rampă a denivelării totale (pe rampa supraînălțării) valorile cuprinse în tabelul 5.4. În cazurile în care nu se poate respecta rampa din tabel, se reduce viteza.

## **CAP. VI. CONCLUZII GENERALE, APLICABILITATEA ȘI VALORIFICAREA REZULTATELOR OBȚINUTE**

Teza de doctorat prezintă o serie de probleme legate de asigurarea condițiilor de confort de către liniile de cale ferată.

Sunt prezentate unele aspecte privind geometria liniilor de cale ferată, alcătuirea suprastructurii liniei și noțiunii privind întreținerea și exploatarea căii, în special probleme legate de abaterile (toleranțele) admise în exploatare.

Geometria căii, în special racordările, ocupă un spațiu important în teză. Este prezentată evoluția racordărilor, a rampei supraînălțării de la începuturile căii ferate până în zilele noastre. Autorul propune o nouă geometrie pentru curbele de racordare, bazată pe criteriul de confort.

Suprastructura trebuie astfel alcătuită încât să asigure circulația materialului rulant fără șocuri, fără smuciri, lin. Sunt prezentate modalități de realizare asupra structurii liniilor de cale ferată, insistând pe acele tipuri de suprastructură moderne, elastice, care asigură condiții confortabile pentru circulația materialului rulant cu viteze sporite și mari.

Pentru a menține calea în condiții optime trebuie stabilite exact limitele, toleranțele admise astfel încât să nu fie afectate nici condițiile de confort și nici cele de siguranța circulației. Autorul prezintă calcule originale privind determinarea toleranțelor de confort, necesare pentru exploatarea liniilor pentru trafic de călători sau mixt, dar și privind toleranțele de siguranță care trebuie utilizate în cazul unor evenimente cu deraiere.

# 1. Contribuții originale

Principalele contribuții originale ale tezei de doctorat sunt următoarele:

- o sistematizare a parametrilor care influențează confortul călătorilor pe liniile de cale ferată;
- prezentarea evoluției amenajării curbilor de cale ferată (în plan și în profil transversal) începând cu primele încercări (Chavés și Nördling) de realizare a racordărilor până la teoriile moderne de amenajare a curbilor de cale ferată cu parabole de grad superior, sinusoidale și cosinusoidale;
- analiza comparativă a diferitelor tipuri de racordări în contextul sporirii vitezei maxime pe liniile existente, fără investiții spectaculoase, dar cu îmbunătățirea condițiilor de confort;
- propunere pentru un nou tip de racordare: „racordare cinetică”, care se bazează în exclusivitate pe criteriul de confort al călătorilor; sunt prezentate relațiile de calcul necesare pentru trasarea „racordării cinetice” cu sau fără preclotoidă;
- analizarea și aprecierea critică a geometriei căii pornind de la criteriile clasice mecanice, prin cele moderne cinematice spre un viitor posibil, curbele cinetice;
- prezentarea pe lângă suprastructurile clasice a celor moderne, cu prinderi elastice, pe traverse bibloc sau metalice, respectiv a ultimelor tipuri de suprastructuri utilizate la unele administrații feroviare occidentale și în Japonia, suprastructuri fără traverse sau cu traversele înglobate în placă de beton, soluții aplicabile și la CFR sau în transporturile urbane pe șine;
- prezentarea unei suprastructuri speciale la trecerile la nivel, pe poduri și în tuneluri, unde trebuie asigurate aceleași condiții de confort ca și pe o linie aflată pe terasament;

- diferențierea clară a criteriilor de confort respectiv a celor de siguranță în stabilirea toleranțelor la ecartament, nivel și direcția căii;
- stabilirea unor toleranțe de exploatare pornind de la criteriul de confort, compararea acestor toleranțe cu cele din instrucțiunile de specialitate;
- analiza caracterului logic al deformațiilor căii ferate, respectiv a sarcinilor care revin unităților de întreținere a liniei astfel încât să fie asigurate condițiile de confort și de siguranță optime.

## **2. Aplicabilitatea și valorificarea rezultatelor obținute**

Rezultatele cercetărilor și studiilor efectuate de autor atât în România cât și în Germania au fost fructificate prin publicarea a 6 lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice naționale cu participare internațională și coautor a tratatului de specialitate „Căi ferate. Elemente de proiectare, construcție, întreținere și exploatare” editat în 2003.

O serie din rezultatele obținute au aplicabilitate în proiectarea liniilor de cale ferată noi, modernizarea sau reabilitarea celor existente sau refacția căii cu material nou:

- posibilitatea sporirii vitezei maxime cu 10...20 km/h pe liniile existente fără investiții majore, prin modificarea geometriei racordărilor, dacă raza curbei circulare permite noua viteză;
- introducerea racordărilor cinetice în locul celor clasice pe linii dedicate în exclusivitate traficului de călători, cu efecte pozitive asupra viitorului transporturilor feroviare;
- introducerea noilor tipuri de suprastructură asigură confort sporit pentru călători;

- amenajarea trecerilor la nivel cu sisteme moderne asigură siguranță și confort atât în transporturile feroviare cât și în cele rutiere;
- funcția exponențială care descrie evoluția deformațiilor liniei de cale ferată poate fi aplicată la stabilirea momentelor optime de intervenție asupra stării căii impunând toleranțe de confort sau siguranță;
- diferențierea clară a toleranțelor de confort de cele de siguranță se poate aplica atât la proiectarea, construcția și întreținerea căii, cât și la analiza unor evenimente de cale ferată cu deraieri, când trebuie luate în considerare toleranțele de siguranță;
- instrucțiile de specialitate (de exemplu instrucția 314/1989 a CFR) trebuie să precizeze clar tipul toleranțelor (de confort și/sau de siguranță) pentru a evita dificultățile la stabilirea cauzelor unei deraieri dar și la organizarea lucrărilor de întreținere și reparații astfel încât să fie menținute în exploatare condițiile de confort impuse.



# BIBLIOGRAFIE

1. ALBRECHT, V.G. Povisitsa nadiosnosti verhnevo stroienia puti. Puti i putievoie hoziaistvo, Moskva, 1981 / 9 .
2. ALBRECHT, V. G., ZOLOTARSKI, A. F. și BASSARSKI, M.P. Sovremennîe construcții verhnevo stroenia jeleznodarojnovoputi. M.Transport, 1975 .
3. ALIAS, I. La voie ferrée. Eyrolles Paris, 1990.
4. ANTON, C. Căi ferate. Vol. I. Litografia I. P. Iași, 1984.
5. ANTON, C. Căi ferate. Vol. I. Litografia I. P. Iași, 1989.
6. ANTONESCU, I. Construcția și întreținerea căii fără joante. Editura transporturilor și telecomunicațiilor, București, 1964.
7. BARTLETT, D.L. The stability of a long welded rail . Civil engineering and public work rev., N653, 1960.
8. BIRMANN, F. Die Mitwirkung des oberbausschusses der Deutschen Bundesbahn bei der Fortentwicklung des Oberbauwesens. E.T.R., 1967 / 10.
9. BIRMANN, F. Neure Messungen an Gleisen mit verschiedenen Unterschwellungen. Eisenbahntechnische Rundschau, 6, 229, 1957.
10. BIRMANN, F și HERBST, W. Beanspruchung der Schiene durch die Belastung und die Gegebenheiten des Fahrweges . E.T.R., 1974 / 3.
11. BIRMANN, F și RAAB, F. Zur Entwicklung durchgehend verschweisster Gleise. Eisenbahntechnische Rundschau, 9, 321, 1960.

12. BROMBERG, E.M. The stability of the jointless track. Izd. Transport, Moscova, 1966.
13. BROMBERG, E.M. Obespecivati ustoicivosti besstâcovo puti. Puti putievoie hoziaistvo, 1964 / 8.
14. BROMBERG, E.M. Ustoicivost bestâcovo puti. Izdatelistvo "Transport", Moskva, 1966.
15. CHATKEO, Y. Die stabilität des Eisenbahngleises im Bogen mit engen Halbmessern bei hohen Axialdruckkräften. T.U. München, 1985 / 46.
16. COSTESCU, I. ș. a. Construcția drumurilor. Ed. Tehnică, București, 2000
17. CUTEANU, E. și HERMAN, A. Modelarea pierderii stabilității căii ferate fără joante supuse la variații de temperatură. Zilele Academice Timișene, 22-24 mai 1997, vol. III, pag. 341...346.
18. DOBLER, J. Die lineare Wirbelstrombremse - Erkenntnisse aus dem Versuchseinsatz bei der Deutschen Bundesbahn. Eisenbahningenieur, Heft 3, 1976 .
19. DOMONKOS, R. Feszültségek alakulása a hézagnélküli vágányokon. V.T.K.I., Budapest, 1982.
20. EISENMANN, J. Auswirkung des Schinenprofils und der Unterschwellung auf die Gleislagebeständigkeit. E.T.R. Darmstadt, 1990 / 10, pag. 619 ... 622.
21. EISENMANN, J. Auswirkungen einer nicht gleichmässigen Schientemperatur auf das Gleis. Eisenbahningenieur (40), 1989, pag. 109 ... 114.
22. EISENMANN, J. Beanspruchung des Eisenbahnoberbaues und seine Weiterentwicklung für höhere Geschwindigkeiten und Achslasten. E.T.R., 1968/5.

23. EISENMANN, J. Die Bedeutung der Abhebewelle der Schiene . Der Eisenbahningenieur, Heft 3, 1976.
24. EISENMANN, J. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Eisenbahn- und Strassenoberbaues. Herausgegeben von o. Prof.Dr.Ing. J. Eisenmann anlässlich des Instituts für Bau von Landverkehrswegen der T.U. München.
25. EISENMANN, J. Lagestabilität des Gleises bei hohnem Geschwindigkeiten . Eisenbahningenieur, 1974/5.
26. EISENMANN, J. Qualität des Oberbauzustandes. Eisenbahningenieur, Darmstadt, 1980/3.
27. EISENMANN, J. Schotteroberbau für hohe Geschwindigkeiten. E.T.R., 1974 / 1 ... 2.
28. EISENMANN, J. Theorie und praxis des durchgehend verschweißten Gleises. E.T.R., 1985 / 4.
29. EISENMANN, J. Theorie und praxis des durchgehend verschweißten Gleises. E.T.R., Darmstadt, 1994 / 1, pag. 45 ... 52.
30. EISENMANN, J. Verhaltensfunktion des Schotters, Folgerungen für hohe Fahrgeschwigkeiten. Eisenbahningenieur, 1981/6.
31. EISENMANN, J., LEYKAUF, G. Actuelle Aufgaben der Oberbau-forschung . Der Eisenbahningenieur, Darmstadt, 1982 / 3.
32. EISENMANN, J., LEYKAUF, G. Brücken als Störstellen im Gleis. Der Eisenbahningenieur, Heft 3, 1987.
33. EISENMANN, J., LEYKAUF, G. Störung der Gleislage beim Übergang zu Kuntsbauwerken . E.T.R., 1977 / 10.
34. EISENMANN, J., LEYKAUF, G. și MATTNER, L. Zukunft-perspectiven zum Eisenbahnoberbau. Eisenbahningenieur, 1992/3, pag. 130 ... 140.

35. EISENMANN, J., MATTNER, L. Auswirkung der Oberbau-  
konstruktion auf die Schotter und Untergrundbeanspruchung.  
Eisenbahningenieur, 1984/3.
36. ENGEL, E. Das Stabilitätsproblem des Eisenbahngleises . Öst. Ing.  
Archiv, 1962 .
37. ENGEL, E. Die Stabilität gekrümmter lückenloser Eisenbahngleise.  
Öst. Ing. Archiv, 1960.
38. ENGEL, E. și VCELAR, J. Die Wahrscheinlichkeit der Gleis-  
verwerfung. Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen T.U. Wien,  
1986 / 11.
39. ESVELD, G. și HENGSTUM, L.A. Gleisstabilität in engen Kurven.  
Schienen der Welt, decembrie 1988, pag. 15 ... 20.
40. FASTERDING, G., FRENZEL, J., LINKER, W. și OSWALD, R.  
Die Y-Stahlschwelle im Konventionellen Gleisbau und als feste  
Fahrbahn auf Asphalt-tragschichten. Eisenbahningenieur, 1986/3.
41. FAZEKAS, F. A hézagnéküli vasúti vágányok állékonysági vizsgálat.  
Teza de doctorat, Budapesta, 1988.
42. FÜHRER, G. și FASTERDING, G. Gleisstabilität durch Y-Stahlsch-  
wellen. Eisenbahningenieur, Darmstadt, 1993/5, pag. 286...296.
43. GERLICH, J., PAHNKE, L. Abtragung der Längskräfte im  
Eisenbahn brückenbau. Archiv für Eisenbahntechnik (37), 1982.
44. GRUPPO NAZIONALE DI COORDINAMENTO PER GLI STUDI DI  
INGEGNERIA GEOTECHNICA DEL C.N.R. Deformazioni in  
prossimità della rotture e resistenza dei terreni naturali e delle rocce.  
C.U.E.N., Napoli, 1991.
45. HERMAN, A. Calea fără joante. Volumul I. Editura Mirton, Timișoara,  
1998.

46. HERMAN, A. Calea fără joante. Teorie și aplicații. Editura Mirton, Timișoara, 2000.
47. HERMAN, A. Concepții noi în calculul stabilității căii fără joante. Zilele Academice Timișene, 1993.
48. HERMAN, A. Considerații privind stabilitatea căii fără joante. Zilele Academice, 23...25 mai 1991, p. 88 ... 94, Timișoara, 1991.
49. HERMAN, A. Influența prisme de balastare asupra stabilității căii fără joante. A VII-a Conferință Națională de Geotehnică și Fundații. Vol. I, pag. 275 ... 280, Timișoara, 1992.
50. HERMAN, A. Influența variației temperaturii în lungul șinei asupra căii fără joante. Zilele Academice Timișene, 1995, Simpozion "Progrese în concepția și realizarea infrastructurilor pentru transporturi", pag. 239 ... 243.
51. HERMAN, A. Posibilități de sporire a rezistenței prisme de piatră spartă în asigurarea stabilității căii. A VII-a Conferință Națională de Geotehnică și Fundații, Vol. I, pag. 281 ... 287, Timișoara, 1992.
52. HERMAN, A. Sinteză documentară privind calea fără joante. Referat, Timișoara, 1992.
53. HERMAN, A. și IVANA, C. Elemente geometrice ale căii ferate, Editura Mirton, Timișoara, 1999.
54. HERMAN, A., STOICESU, G., HERMAN, C. și CARA, P. Căi ferate. Elemente de proiectare, construcție, întreținere și exploatare. Editura Mirton, Timișoara, 2003.
55. HILA, V., RADU, C. și alții. Calea fără joante. C.P.L.T.Tc. București, 1979.

56. HILA, V., RADU, C. și alții . Calea fără joante . Partea a II-a.  
C.P.L.T.Tc. București, 1981.
57. HORVÁTH, A. A nem lineáris stabilitásvizsgálat módszereinek alkalmazása vágánykivetődésnél. Mélyépitéstudományi szemle.  
1985 / 3 . pag. 131 ... 134.
58. HÖHBERGER, H.E. și SPIES, J.W. Meßverfahren zur Erfassung von Längsspannung und Spannungsfreier Temperatur im lückenlos verschweißten Gleis . E.T.R., Darmstadt, 1988 / 1 / 2, pag. 61...66.
59. HUBER, M.T. Über die stabilität gerader lückenloser Gleise. Gleistechnik und Bahnbau, H.18, 1936 .
60. IZDRĂILĂ, V. Căi ferate. Elemente de proiectare . Litografia I.P.T.V. Timișoara, 1990.
61. IZDRĂILĂ, V. și HERMAN, A. Întreținerea și exploatarea liniilor de cale ferată. Litografia U.T. Timișoara, 1993.
62. IZDRĂILĂ, V. și BERBERICH, W. Căi ferate. Partea a II-a. Suprastructura. Litografia I.P.Traian Vuia, Timișoara, 1981.
63. JANIN, G.J. La résistance latérale de la voie fereé. Le problème de la stabilsation du ballast. Revue générale de chemins de fer, Paris, 1957 .
64. KAESS, G. și MATTNER, L. Gleisverwerfungsversuche zur Verifizierung einer erweiterten Lagestabilitätstheorie . E.T.R., Darmstadt, 1989/3, pag. 151...155.
65. KÁRMÁN, T. von și TSIEN, H.S. The buckling of spherical shells by external pressure. J. Aero. Sci. 7, 43, 1939.
66. KENNEY, J.T. Steady - state vibrations of beam on elastic foundation for mooving load. J. Appl. Mech, 21, 359, 1954.

67. KERKÁPOLY, E. ș.a. Vasútépítéstan . T.K.K., Budapest, 1989.
68. KERR, A.D. Analysis of thermal track buckling in the lateral plane.  
Acta Mechanica, 30, 17, 1978 .
69. KERR, A.D. Lateral buckling of rail road tracks due to constrained thermal expansion , Railroad Track Mechanics and  
Technonology, Pergamon Press, 1978.
70. KERR, A.D. Termiceskaia poteria ustoicivosti jeleznodorojnogo puti v proiamuh. Jelezni dorogi mira, Moskva, 1981 / 2.
71. KLOTZINGER, E. și FORTIN, J-P. Le problème de la stabilisation du ballast. Essais communs Ö.B.B. - S.N.C.F. . Revue générale de chemins de fer, Paris, 1978 .
72. KLUGAR, K. Einfluss der mechanischen Nachverdichtungsverfahren auf den Querverschiebewiderstand des Gleises . E.T.R., 1972/6.
73. KLUGAR, K. Gleisverwerfungsversuche der Österreichischen Bundesbahnen mit neue Schwellenformen. Eisenbahningenieur, 1974 / 3.
74. KOITER, W.T. Over de stabiliteit van het elastisch evenwicht. Thesis, Amsterdam, 1945.
75. LEYKAUF, G. și MATTNER, L. Elastisches Verformungsverhalten des Eisenbahnoberbaus . Eisenbahningenieur, 1990 / 3, pag. 110 ... 120.
76. MANOLIU, I. Fundații și procedee de fundare . Ed. didactică, București, 1983.
77. MARIN, M. Fundații continue prefabricate pentru clădiri cu suprastructură din panouri mari. Teza de doctorat, Timișoara, 1983.
78. MARTINET, A. Flambement des voies sans joints sur ballast et rails de grande longueur. Revue Générale de Chemins de Fer, No.10,1936.
79. MEIER, H. Das Siecherheitsproblem beim lückenlosen Gleis. Verkehr u. Technik, 1963 / 7.

80. MEIER, H. Experimentelle Oberbauforschung . Eisenbahningenieur, 1957 / 7 .
81. METZLER, J.M. Les grandes vitesses ferroviaires . École Nationale des ponts et chaussées, E.S. 24, 1979.
82. NAGY, J. A vasúti vágány teljes oldalirányu ellenállásvizsgálatának továbbfejlesztése. B.M.E., 1970.
83. NAGY, J. Dinamikus hatások kísérleti vizsgálata a hézagnélküli vágányok állékonyságára. V.T.K.I., Budapest, 1980.
84. NAGY, J. Összefoglaló jelentés a vágányállékonysági vizsgálatok az alátámasztó szerkezetekre vonatkozóan c. témáról. , V.T.K.I. Budapest, 1983.
85. NECHITA, M. și KÖLLŐ, G. Căi ferate . Litografia I.P. Cluj-Napoca, 1982.
86. NEEDLEMAN, A și TVERGAARD, V. Aspects of plastic post-buckling behaviour. Mechanics of Solids, The Rodney Hill 60-th Anniversary volume, Pergamon Press, 1981.
87. NEMESDY, E. A vágányok kivetődéssbiztonságának számítása. K.T.SZ. Budapest, 1959.
88. NOVAKOVICI, V.I. O polzucesti besstîkovo puti v poperecinom napravlenii pod geistviem prodolnîh sil . Vestnik, VNIITa, no 5., 1976 .
89. NOVAKOVICI, V.I. Prodolnîe silî v besstîkovom putî pri ucete factora vremeni. Vestnik, VNIITa, no 1., 1972.
90. NOVAKOVICI, V.I. Prodolnîe silî v relsak jeleznodarojnovo puti s ucetom factora vremeni . Stroitelstvo i exploatația jeleznodarovo puti, Kiev, 1975.



91. NUMATA, M. Buckling strenght of continuous welded rail . Bulletin International Railway Congres Association, English Edition, 1960.
92. PETZ, M. Die durch den fahrenden zug verursachte horizontale Gleisbewegung. Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen, T.U. Wien, 1986 / 11.
93. PFÖRTNER, R. Beitrag zur Lagessicherheit lückenloser Strabenbahngleise. Disertation . Drezda, 1988.
94. PROMMERSBERGER, G. și ROJEK, R. Tragsysteme zur Abtragung von Langskraften auf Eisenbahnbrücken. Eisenbahningenieur, 1985 / 7 .
95. PRUD'HOMME, A. și JANIN, G. Stabilitatea liniilor cu șine lungi sudate ( traducere din lb. franceză ). Revue Générale de Chemins de Fer, Paris, feb. 1969 pag. 83...106 și mai 1969 pag. 151 ... 156.
96. PRUD'HOMME, A. și JANIN, G. Ustoicivoisti puti s dlinnîmi sbarnîmi relisovâmi pletiami . Ejemesiacimâi biuleteni Mejdunarodnâi assițiații j. d. kongressov, Moskva no 3, 1972.
97. RAAB, J. Die Biegesteifigkeit eines Gleisjoches . E.T.R., 1959 / 3.
98. RADU, C. Suprastructura căii, probleme . I.C. București, 1972.
99. RĂDULESCU, M. Calea fără joante. Stabilitatea și calculul eforturilor. Editura transporturilor și comunicațiilor, București, 1963.
- 100.SAMAVEDAM, G. și KISH, A. Analisy of Thermal Bucking Tests on United States Railroads. DOT/FRA/ORD – 82/45, 1982.
- 101.SCHOLER, S. Instability of railwaytracks . Dept. of Solid Mech., Techn. Univ. of Denmark, 1977.
- 102.TEODORESCU, C.C. Teoria șinei fără joante supuse la variații de temperatură . Editura Academiei R.S.R., București, 1965.

103. THOMPSON, H. A general theory of elastic stability . Wiley and Sons, London - New York, 1973.
104. TIMOSHENKO, S.P. Method of analysis of statical and dynamical stresses in rail . Proc. 2nd International Congress for Appl. Mech, Zürich, 1926.
105. TIMOSHENKO, S.P. Teoria stabilității elastice , Editura Tehnică, București 1967.
106. TOADER, I.H.I. Stability Functions for Members with semirigid joint connections. Journal of Structural Engineering, vol.119, feb. 1993, New York.
107. TOWPIK, K. Opory boczne podsypki . Udawnoctwa Komunikacji i Łacznosci, Varşovia, 1970.
108. TVERGAARD, V. Effect of thickness inhomogeneities in internally pressurized elastic-plastic spherical shells . J. Mech. Phys. Solids, 24, 291, 1976.
109. TVERGAARD, V. și NEEDLEMAN, A. On localized thermal track buckling . Technical University of Denmark, 1981.
110. TVERGAARD, V. și NEEDLEMAN, A. On the localization of buckling patterns . J. Appl. Mech. . 47, 613, 1980.
111. VAISH, V.K., Lateral buckling of track . Rail international 5, 437, 1974.
112. VASZARY, P. și KISS, F. Vasuti pályafenntartás . T.K.K. Budapest, 1990.
113. VCELAR, J. Zur Verwerfungssicherheit von geraden und gekrümmten Eisenbahngleisen in Abhängigkeit wahrscheinlichkeitsverteilter Parameter. Arbeiten des Inst. für Eisenbahnwesen TU Wien, 1986 / 11.

114. WEAVER, W. Computer Programs for Structural Analysis , London, 1965.
115. ZIENKIEWICZ, S.P., The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, Mc.Graw - Hill Publishing Company Limited, London, 1967.
116. \* \* \* Ballast and foundation materials research program. Virginia, 1977.
117. \* \* \* Calea sudată alcătuită din tronsoane cu lungimea nelimitată. Ed. Univ. de Stat Lvov, 1984.
118. \* \* \* Colecția STAS .
119. \* \* \* Faschbach Zusammenstellung von Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen. Sowie Tabellen und Formeln. Eisenbahn - Fachverlag, Heidelberg - Mainz, 1982.
120. \* \* \* Instrucția nr. 314 de norme și toleranțe pentru construcția și întreținerea căii. Linii cu ecartament normal.
121. \* \* \* Instrucția nr. 341 pentru alcătuirea, întreținerea și supravegherea căii fără joante, MTTc, București, 1980.
122. \* \* \* Instrucțiuni de serviciu .
123. \* \* \* La vie du rail. Colecția 1988 ... 2004.
124. \* \* \* Microsoft FORTRAN. Referențe, versiunea 5.0 .Ed. U.S.A., 1989.

# CUPRINS

<b>PREFAȚĂ.....</b>	<b>1</b>
<b>CAP. I. NOȚIUNI GENERALE.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Viitorul transporturilor feroviare in sistemul de transport european.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Parametrii tehnici.....</b>	<b>11</b>
2.1. Viteza de circulație.....	11
2.2. Sarcina maximă admisă pe osie.....	13
2.3. Influența solicitărilor dinamice asupra suprastructurii.....	14
2.4. Influența sporirii sarcinii pe osie asupra elementelor componente ale suprastructurii.....	15
2.5. Numărul firelor de circulație în linie curentă.....	17
2.6. Numărul de linii în stații și lungimea acestora.....	18
<b>CAP. II GEOMETRIA CĂII.....</b>	<b>21</b>
<b>1. Traseul în plan.....</b>	<b>21</b>
1.1. Arcul de cerc și supraînălțarea.....	21
1.2. Racordări.....	26
<b>2. Evoluția teoriei racordărilor.....</b>	<b>35</b>
2.1. Introducerea clotoidei la racordările liniilor CF.....	35
2.2. Cazul vitezelor mai mici de 80 km/h respectiv 40 km/h.....	41
<b>3. Racordări moderne.....</b>	<b>42</b>
3.1. Condiții pe care trebuie să le îndeplinească o curbă de racordare.....	44
3.2. Geometria curbelor de racordare în plan orizontal.....	47

3.2.1. Variația liniară a curburii.....	48
3.2.2. Variația parabolică a curburii.....	48
3.2.3. Variația sinusoidală a curburii.....	49
3.2.4. Variația cosinusoidală a curburii.....	50
3.3. Racordarea unui aliniament cu o curbă circulară.....	51
3.3.1. Parabola cubică.....	54
3.3.2 Parabola de gradul 4.....	55
3.3.3. Racordarea sinusoidală.....	59
3.4. Racordarea cosinusoidală.....	61
<b>4. Supraînălțarea liniilor de cale ferată în curbe.....</b>	<b>62</b>
4.1. Calculul supraînălțării.....	67
4.2. Viteza maximă admisibilă și raza minimă.....	70
4.3. Rampa supraînălțării.....	70
4.4. Rampa supraînălțării între aliniament și curba circulară.....	72
4.4.1. Rampa liniară.....	73
4.4.2. Rampa parabolică.....	73
4.4.3. Rampa sinusoidală.....	74
4.4.4. Rampa cosinusoidală.....	75
4.5. Analiza comparativă a rampelor supraînălțării studiate.....	75
<b>5. Lungimea curbelor de racordare.....</b>	<b>80</b>
5.1. Variația accelerației normale.....	80
5.2. Accelerația unghiulară.....	83
5.3. Viteza de ridicare a roții pe firul exterior.....	85
5.4. Condiții constructive pentru determinarea lungimii minime a racordării.....	87
5.4.1. Concluzii.....	88

5.5. Sporirea vitezei maxime pe liniile existente.....	88
<b>6. Posibilitățile de aplicare ale noilor teorii privind</b>	
<b>geometria căii.....</b>	<b>90</b>
<b>CAP. III. RACORDĂRI CINETICE.....</b>	<b>97</b>
<b>1. Definirea puterii mecanice în curba de racordare.....</b>	<b>97</b>
<b>2. Puterea mecanică în racordările cu variația liniară respectiv</b>	
<b>în S a curburii.....</b>	<b>99</b>
<b>3. Geometria racordărilor cinetice.....</b>	<b>101</b>
<b>3.1. Geometria racordărilor cinetice pentru curbe</b>	
<b>fără supraînălțare.....</b>	<b>101</b>
<b>3.2. Trecerea de la clotoidă la racordare cinetică.....</b>	<b>105</b>
<b>3.3. Geometria racordărilor cinetice pentru curbe</b>	
<b>cu supraînălțare.....</b>	<b>107</b>
<b>CAP. IV. SUPRASTRUCTURA CĂII FERATE.....</b>	<b>110</b>
<b>1. Șine.....</b>	<b>110</b>
<b>1.1. Analiza profilului șinei.....</b>	<b>111</b>
<b>1.2. Elementele caracteristice ale șinelor de cale ferată.....</b>	<b>112</b>
<b>2. Material mărunț de cale.....</b>	<b>119</b>
<b>2.1. Prinderea șinelor de traverse.....</b>	<b>119</b>
<b>2.1.1. Prinderi simple.....</b>	<b>120</b>
<b>2.1.2. Prinderi directe.....</b>	<b>121</b>
<b>2.1.3. Prinderea mixtă.....</b>	<b>122</b>
<b>2.1.4. Prinderea indirectă.....</b>	<b>122</b>
<b>2.1.5. Prinderi elastice.....</b>	<b>128</b>

2.2. Joantele de cale ferată.....	133
2.3. Dispozitive contra fugirii șinelor.....	137
2.4. Dispozitive contra deripării.....	139
<b>3. Traverse.....</b>	<b>140</b>
4.1. Traverse din lemn.....	141
4.2. Traverse din beton.....	144
4.3. Traverse metalice.....	149
<b>4. Prisma căii.....</b>	<b>154</b>
4.1. Rezistența opusă de piatra spartă la deriparea căii.....	157
4.1.1. Lăsăturile oarbe influențează rezistența $q$ .....	164
4.1.2. Variația rezistenței $q$ în lungul căii.....	164
4.2. Rezistența opusă de piatra spartă la deplasarea căii în lung.....	166
4.3. Rezistența opusă de cale la deformația în plan vertical.....	169
<b>5. Suprastructuri speciale.....</b>	<b>169</b>
5.1. Suprastructura trecerilor la nivel.....	169
5.2. Contrașine în curbe.....	173
5.3. Contrașine pe poduri.....	174
5.4. Linia de cale ferată în tuneluri.....	175
5.5. Linia de cale ferată pe poduri.....	176
<b>CAP. V. TOLERANȚE DE CONFORT ÎN EXPLOATARE.....</b>	<b>179</b>
1. Caracterul legic al deformațiilor căii ferate.....	179
2. Particularitățile lucrărilor de întreținere.....	187
3. Generalități despre mărimea deformațiilor și uzurilor căii și limitele admise.....	193

<b>4. Deformațiile căii în exploatare.....</b>	<b>196</b>
<b>4.1. Toleranțe admise la ecartament.....</b>	<b>197</b>
<b>4.2. Toleranțe admise la deriparea căii.....</b>	<b>201</b>
<b>4.3. Toleranțe la nivel longitudinal.....</b>	<b>205</b>
<b>4.3.1. Toleranțe la denivelări longitudinale (cocoșe și lăsături).....</b>	<b>206</b>
<b>4.3.2. Denivelări transversale.....</b>	<b>210</b>
<b>4.3.2.1. Denivelări transversale în aliniament.....</b>	<b>211</b>
<b>4.3.2.2. Denivelări transversale în curba arc de cerc.....</b>	<b>220</b>
<b>4.3.2.3. Denivelări transversale pe rampa supraînălțării.....</b>	<b>223</b>
<b>CAP. VI. CONCLUZII GENERALE,</b>	
<b>APLICABILITATEA ȘI VALORIFICAREA</b>	
<b>REZULTATELOR OBȚINUTE.....</b>	<b>227</b>
<b>1. Contribuții originale.....</b>	<b>228</b>
<b>2. Aplicabilitatea și valorificarea rezultatelor obținute.....</b>	<b>229</b>
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>231</b>