

La incidencia de las temperaturas ambientales en las roturas de carril (*)

Por LUIS MIGUEL VELILLA ALMARAZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

La incidencia estacional en el desarrollo de defectos en los carriles es un fenómeno conocido. El estudio emprendido en la red ferroviaria española ha permitido cuantificarlo y establecer unas leyes sencillas de previsión y evolución de las roturas de carril a lo largo de cada año, que suponen indirectamente una valoración de la influencia de las temperaturas ambientales.

De entre los diversos factores que pueden ejercer su influencia en la aparición o desarrollo de defectos en el carril, es tal vez la temperatura ambiental el que tenga un efecto más claro sobre el fenómeno de fisuración de los carriles.

El origen de esta incidencia radica en las variaciones térmicas a que está sometido el material y la temperatura a la que se efectúa la liberación de tensiones en la barra larga, sistema éste de constitución de vía ya prácticamente generalizado.

Las tensiones que crean estas diferencias de temperatura

$$\sigma_T = \alpha \cdot E \cdot \Delta t$$

siendo: α = coeficiente de dilatación

E = módulo de elasticidad del carril

Δt = diferencia de temperatura

serán de tracción en invierno y de compresión en verano y alcanzan valores medios de hasta 10 kg/mm² según OBERWEILER.

No obstante, los valores máximos serán función de los rigores extremos y son particularmente peligrosos en invierno, cuando a causa del frío las tensiones de tracción longitudinal se superponen al complejo estado tensional del carril, del mismo signo en algunos puntos del perfil, provocando una minoración de las flexiones soportables al paso de los trenes y por tanto un desarrollo más rápido de los defectos de fatiga (Comité ORE D117).

Además, el hecho de que el descenso de temperatura vaya acompañado de una disminución de la tensión de rotura del carril (LOSADA), sitúa a éste en condiciones muy desfavorables frente a las bajas temperaturas.

Por el contrario, en verano las retiradas por fatiga son menos numerosas que en invierno, debido a la incidencia favorable que ejerce la compresión térmica a que está sometido el carril en aquella época del año.

La solución (que en algún momento ha podido ser considerada para situar al material en mejores condiciones frente al frío) de rebajar la temperatura de neutralización, para así reducir las tensiones de tracción longitudinales, no es aconsejable, al menos con la vía clásica sobre traviesas, pues incrementaría apreciablemente las tensiones de compresión en verano y, por tanto, crecerían los riesgos de pandeo lateral del emparrillado.

No sólo las roturas por fatiga, sino cualquier otro tipo de defecto con origen interno y muy particularmente las soldaduras, se ven afectados por los razonamientos anteriores. De hecho, la Administración ferroviaria francesa considera la influencia de las temperaturas como un fenómeno afectando al total de roturas más que a su distribución.

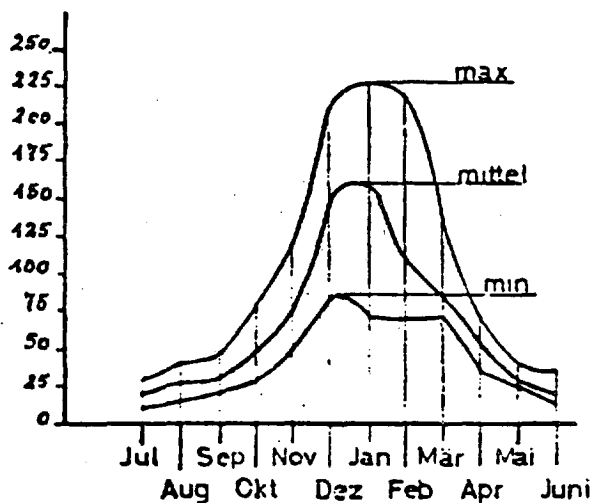
La incidencia estacional para diversas Administraciones europeas puede apreciarse en los gráficos adjuntos (fig. 1), correspondientes al estudio de períodos anuales o plurianuales, según los casos, en función de los meses de aparición de roturas, obviamente ligados a las temperaturas reinantes.

En la Administración española se han realizado estudios estadísticos en diversos períodos, analizando por separado los casos de roturas en juntas, en soldaduras y los restantes tipos de defectos globalmente considerados.

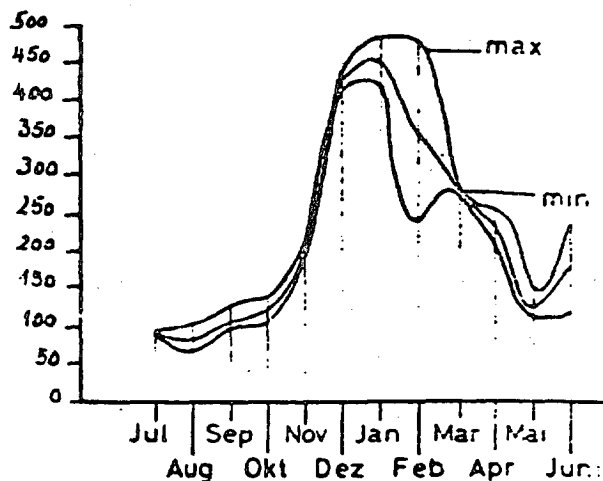
Para ello se han examinado los datos recogidos en los partes de retirada de carril establecidos para cada caso que se presentaba, así como el correspondiente cupón retirado.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1991.

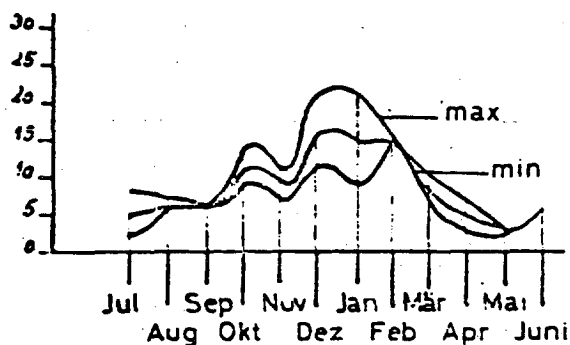
S.N.C.F.



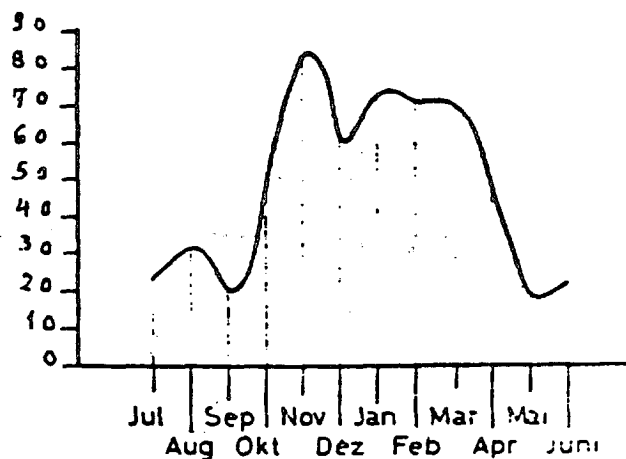
DB



CEE



BR



NS

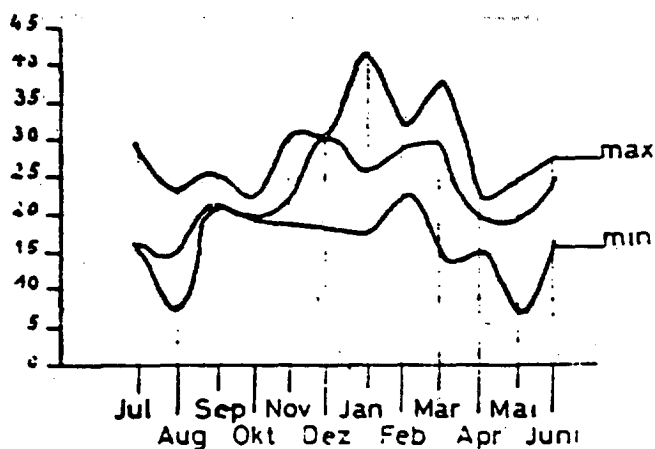


Figura 1

LA INCIDENCIA DE LAS TEMPERATURAS AMBIENTALES EN LAS ROTURAS DE CARRIL

Abcisas = Meses del año

Ordenadas = Cifras medias de porcentajes calculados sobre el valor absoluto de roturas de cada año.

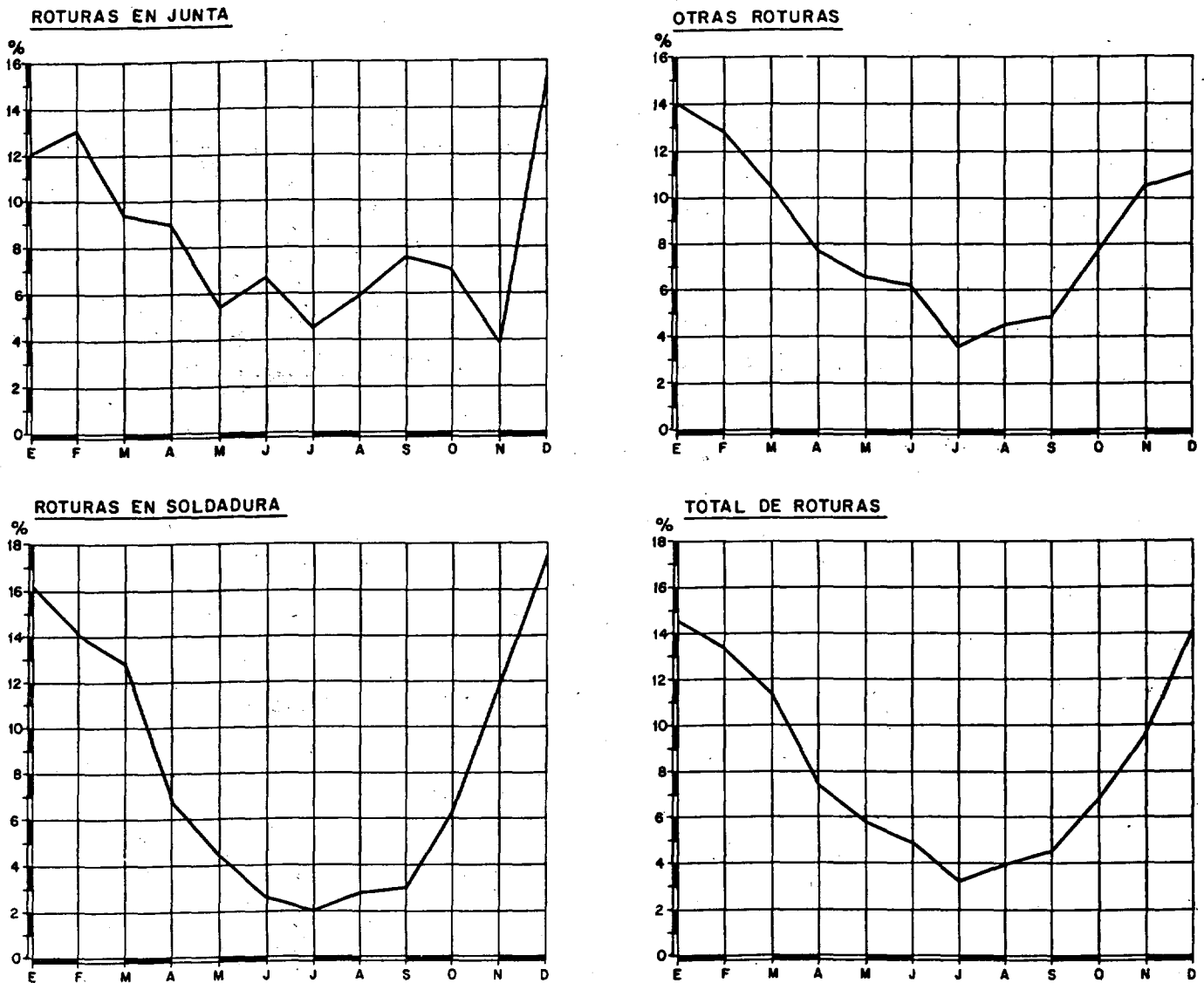


Figura 2.

Así, pudieron seleccionarse todos aquellos expedientes (2.307) que reunían las siguientes condiciones:

- Año de colocación del carril: posterior a 1949
- Estado de colocación: nuevo
- Peso: igual o superior a 45 kg/ml

Esta última premisa equivale a admitir solamente carriles de 45 kg/ml y 54 kg/ml.

El primer estudio realizado entre 1970 y 1978 puso ya claramente de manifiesto una tendencia

parabólica en la distribución, principalmente para las roturas en soldadura y para el total de roturas como se observa en la figura 2.

Ello hace que sea perfectamente lícita la introducción de una curva de ajuste que refleje esta circunstancia. Tratando los datos en ordenador mediante un programa de regresión polinómica, se han obtenido las correspondientes funciones representativas del fenómeno, que se exponen en la tabla 1, juntamente con los resultados de los restantes polinomios tanteados.

Tabla 1

RESULTADO DE LOS AJUSTES POLINOMICOS EFECTUADOS PARA LOS DIVERSOS GRUPOS DE ROTURAS DE CARRIL, CLASIFICADOS SEGUN LOS MESES EN QUE SE HAN PRODUCIDO

ROTURAS EN JUNTA					
Grado	x^0	x^1	x^2	x^3	ρ^2
1	9,94697	-0,24825			0,06194
2	17,15909	-3,33916	0,23776		0,59220
3	13,13232	-0,22690	-0,33749	0,02950	0,66305
ROTURAS EN SOLDADURA					
1	10,06970	-0,26713			0,02803
2	25,07727	-6,69895	0,49476		0,92555
3	19,67172	-2,52103	-0,27747	0,03960	0,97546
OTRAS ROTURAS					
1	10,46515	-0,32797			0,12134
2	18,84091	-3,91758	0,27612		0,92408
3	17,16869	-2,62513	0,03724	0,01225	0,93779
TOTAL DE ROTURAS					
1	10,36970	-0,31329			0,07378
2	21,03636	-4,88472	0,35165		0,94138
3	17,38788	-2,06482	-0,16956	0,02673	0,98488

ρ representa el coeficiente de correlación múltiple y x^0 el término independiente de cada uno de los polinomios, correspondiendo los restantes exponentes a los coeficientes de esos términos.

Estos ajustes se han realizado probando hasta el tercer grado, sobre el porcentaje de roturas habidas mensualmente respecto al total anual.

El criterio adoptado para seleccionar la función representativa del fenómeno ha sido el siguiente:

- Grado mínimo.
- Coeficiente de correlación múltiple suficientemente alto.
- Resultado idóneo del test de bondad de ajuste.

Esta última condición está incluida en el programa y facilita la elección más apropiada para cada caso.

Así pues, de las funciones obtenidas se han seleccionado las de segundo grado, con coeficientes de correlación de 0,96 a 0,97, excepto para el caso de roturas en junta en el que los ρ hallados exigen llegar al tercer grado y aún así el resultado obtenido sólo debe considerarse como una tendencia orientativa.

La validez de los polinomios calculados ha sido contrastada sobre los datos de años posteriores.

Los valores medios de los 1.075 casos, del período de cinco años, entre 1979 y 1983, se representan gráficamente en la figura 3, conjuntamente con la curva de regresión antes determinada para el período 1970-1978.

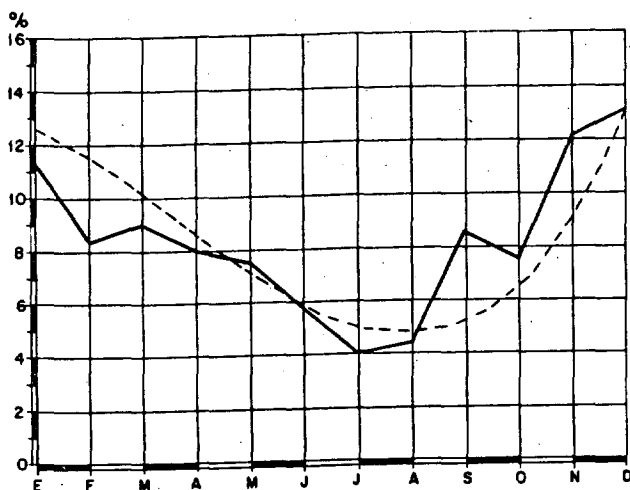
Como puede apreciarse se mantiene la tendencia estimada, lo que nos ha inducido a incorporar estos datos al estudio inicialmente emprendido y así, reajustando ligeramente los polinomios antes hallados, establecer unas curvas de ajuste en base a un período de 14 años, que hemos considerado como definitivas y que constituyen unas leyes de previsión que determinan la evolución de las roturas a lo largo de cada año (tabla 2).

Excepto en las roturas en junta en que se hace precisa una expresión de tercer grado y con un coeficiente de correlación no excesivamente bueno ($\rho = 0,91$), en los restantes casos las funciones de segundo grado calculadas presentan un excelente ρ (de 0,98 a 0,99).

Por consiguiente, se pone de relieve la influencia de las bajas temperaturas en la aparición de roturas. Esta influencia es más acusada en las roturas en soldadura y más atenuada en las de

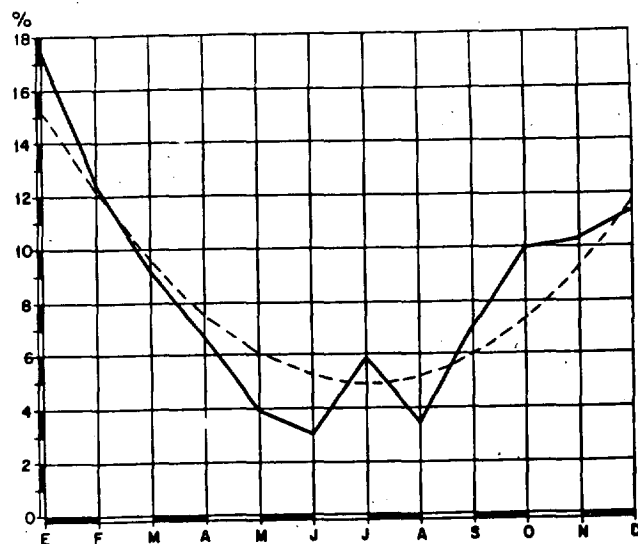
LA INCIDENCIA DE LAS TEMPERATURAS AMBIENTALES EN LAS ROTURAS DE CARRIL

ROTURAS EN JUNTA



— Resultados 1979-83
 - - - Ajuste periodo 1970-78

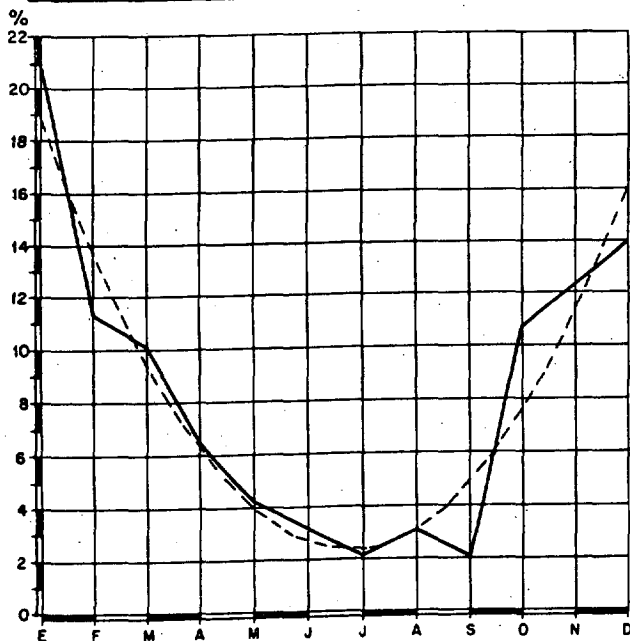
OTRAS ROTURAS



Abscisas = Meses del año

Ordenadas = Cifras medias de porcentajes calculados sobre el valor absoluto de roturas de cada año.

ROTURAS EN SOLDADURA



TOTAL DE ROTURAS

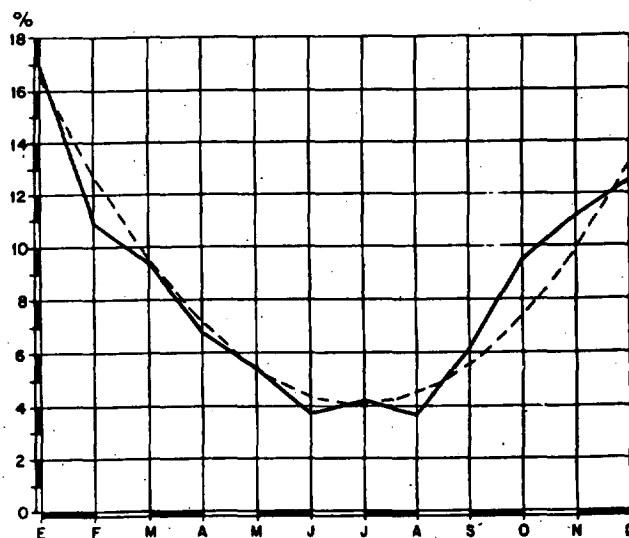


Figura 3.

Tabla 2
ROTURAS EN SOLDADURA

RESULTADOS PARA POLINOMIOS DE GRADO 2

Coeficientes polinómicos		Polinomios ortogonales			Polinomios en x		
Grado		Coeficiente de regresión	Error standard	Valor T	Coeficiente de regresión	Error standard	Valor T
0		28.86751	1.19399	24.24	25.21817	1.23092	20.49
1		-3.37842	1.19399	12.84	26.73187	1.43535	-15.46
2		18.12420	1.19899	15.22	0.49610	0.03260	15.22
Residual mean square =		1.41845 (D.F. = 9)					
Multiple r-square =		0.96380					
caso no.		caso	valor x	valor y	Valor predicho	residual	Valor polin. ortog. grado 2
1		1.00000	1.00000	17.89999	18.98241	-1.08242	0.50183
2		1.00000	2.00000	13.10000	13.73886	-0.63886	0.22810
3		1.00000	3.00000	11.80000	9.48751	2.31249	0.00912
4		1.00000	4.00000	6.50000	6.22837	0.27163	-0.15511
5		1.00000	5.00000	4.30000	3.96144	0.33856	-0.26460
6		1.00000	6.00000	2.80000	2.68671	0.11329	-0.31935
7		1.00000	7.00000	2.00000	2.40420	-0.40420	-0.31935
8		1.00000	8.00000	2.90000	3.11389	10.21389	-0.26460
9		1.00000	9.00000	2.70000	4.81578	-2.11578	-0.15511
10		1.00000	10.00000	7.80000	7.50989	0.29011	0.00912
11		1.00000	11.00000	12.10000	11.19620	0.90380	0.22810
12		1.00000	12.00000	16.09999	15.87472	0.22527	0.50183

ROTURAS EN JUNTA

RESULTADOS PARA POLINOMIOS DE GRADO 3

Coeficientes polinomio		Polinomios ortogonales			Polinomios en x		
Grado		Coeficiente de regresión	Error standard	Valor T	Coeficiente de regresión	Error standard	Valor T
0		28.86751	1.46882	19.65	12.67677	2.40310	5.28
1		-1.37144	1.46882	10.93	-0.46859	1.53667	-0.30
2		8.48911	1.46882	5.78	-0.26056	0.26915	-0.97
3		2.72057	1.46882	1.85	0.02528	0.01365	1.85
Residual mean square =		2.15742 (D.F. = 8)					
Multiple r-square =		0.82497					
caso no.		caso	valor x	valor y	Valor predicho	residual	Valor polin. ortog. grado 2
1		1.00000	1.00000	11.80000	11.97289	-0.17289	-0.45993
2		1.00000	2.00000	11.40000	10.89957	0.50043	0.04181
3		1.00000	3.00000	9.30000	9.60846	-0.30846	0.19268
4		1.00000	4.00000	6.60000	8.25124	0.34876	0.34843
5		1.00000	5.00000	6.20000	6.97958	-0.77958	-0.26481
6		1.00000	6.00000	6.40000	5.94514	0.45486	0.09756
7		1.00000	7.00000	4.30000	5.29961	-0.99961	-0.09756
8		1.00000	8.00000	5.40000	5.29465	0.20535	-0.26481
9		1.00000	9.00000	8.00000	5.78193	2.21807	-0.34843
10		1.00000	10.00000	7.20000	7.21312	-0.01312	-0.29268
11		1.00000	11.00000	6.80000	9.63989	-2.83989	-0.04181
12		1.00000	12.00000	14.60000	13.21392	1.38608	0.45993

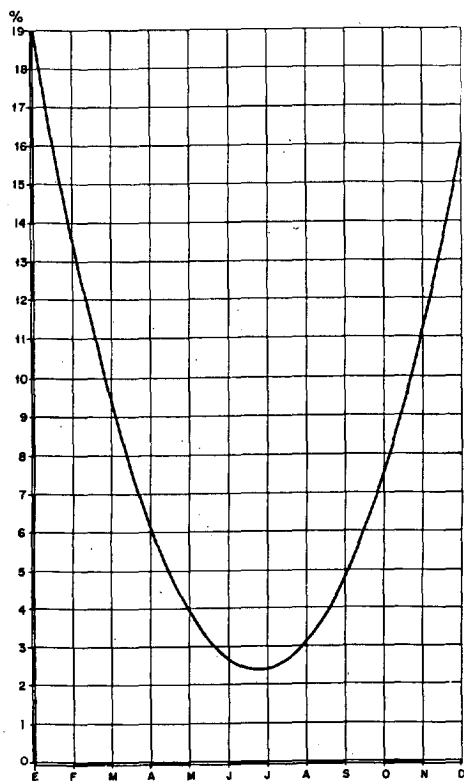
Coeficientes polinomios		Polinomios ortogonales			Polinomios en x		
Grado	Coeficiente de regresión	Error standard	Valor T	Coeficiente de regresión	Error standard	Valor T	
0	28.86751	0.72611	39.76	19.48636	0.75045	25.97	
1	-3.62093	5.72611	14.99	14.23916	0.26542	-15.97	
2	11.06212	0.72611	15.23	0.30280	0.01988	15.23	
Residual mean square =		0.52723 (D.F. = 9)					
Multiple r-square =		0.96616					
caso no.	caso	valor x	valor y	Valor predicho	residual	Valor polin. ortog. grado 2	
1	1.00000	1.00000	15.20000	15.55000	-0.35000	0.50183	
2	1.00000	2.00000	12.60000	12.21923	0.38077	0.22810	
3	1.00000	3.00000	9.90000	9.49406	0.40594	0.00912	
4	1.00000	4.00000	7.30000	7.37447	-0.07448	-0.15511	
5	1.00000	5.00000	5.60000	5.86049	-0.26049	-0.26460	
6	1.00000	6.00000	5.10000	4.95210	0.14790	-0.31935	
7	1.00000	7.00000	4.40000	4.64930	-0.24930	-0.31935	
8	1.00000	8.00000	4.10000	4.95210	10.85210	-0.26460	
9	1.00000	9.00000	5.60000	5.86049	-0.26049	-0.15511	
10	1.00000	10.00000	8.60000	7.37448	1.22552	0.00912	
11	1.00000	11.00000	10.40000	9.49406	0.90594	0.22810	
12	1.00000	12.00000	11.20000	12.21923	-1.01923	0.50183	

TOTAL DE ROTURAS

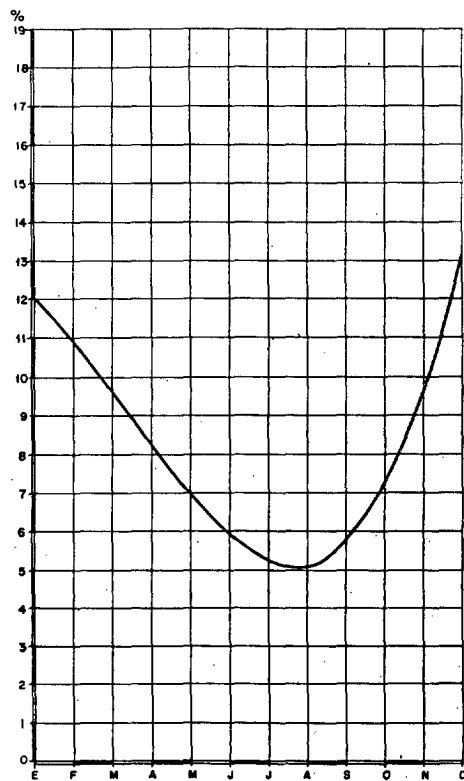
RESULTADOS PARA POLINOMIOS GRADO 2

Coeficientes polinomios		Polinomios ortogonales			Polinomios en x		
Grado		Coeficiente de regresión	Error standard	Valor T	Coeficiente de regresión	Error standard	Valor T
0		28.86751	0.62511	46.18	20.76364	0.64607	32.14
1		-3.19444	0.62511	15.11	-4.85025	0.22850	-21.23
2		12.87965	0.62511	20.60	0.35255	0.01711	20.60
Residual mean square =		0.39076 (D.F. = 9)					
Multiple r-square =		0.98042					
caso no.	caso	valor x	valor y	Valor predicho	residual	Valor polin. ortog. grado 2	
1	1.00000	1.00000	15.40000	16.26593	-0.86593	0.50163	
2	1.00000	2.00000	12.50000	12.47333	0.02667	0.22810	
3	1.00000	3.00000	10.90000	9.38581	1.21418	0.00912	
4	1.00000	4.00000	7.10000	7.00340	0.09660	-0.15511	
5	1.00000	5.00000	5.70000	5.32607	0.37393	-0.26460	
6	1.00000	6.00000	4.50000	4.35385	0.14615	-0.31935	
7	1.00000	7.00000	3.60000	4.08671	-0.48671	-0.31935	
8	1.00000	8.00000	3.90000	4.52467	10.62468	-0.26460	
9	1.00000	9.00000	5.10000	5.66773	-0.56773	-0.15511	
10	1.00000	10.00000	7.80000	7.51588	0.28412	0.00912	
11	1.00000	11.00000	10.20000	10.06913	0.13087	0.22810	
12	1.00000	12.00000	13.60000	13.32747	0.27253	0.50183	

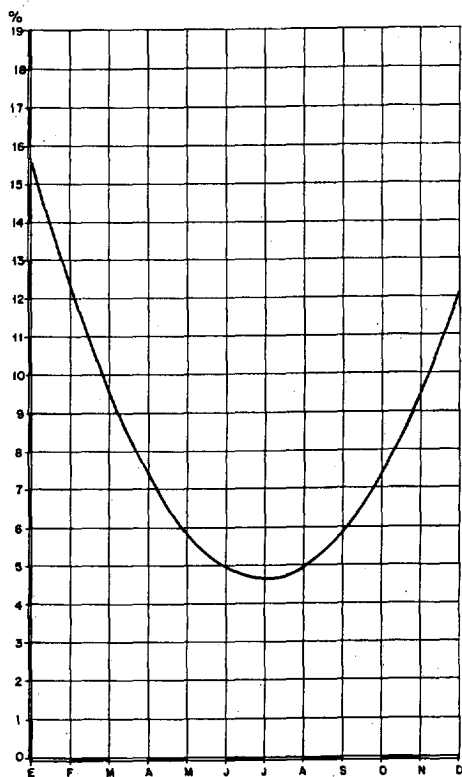
ROTURAS EN SOLDADURA



ROTURAS EN JUNTA



OTRAS ROTURAS



TOTAL ROTURAS

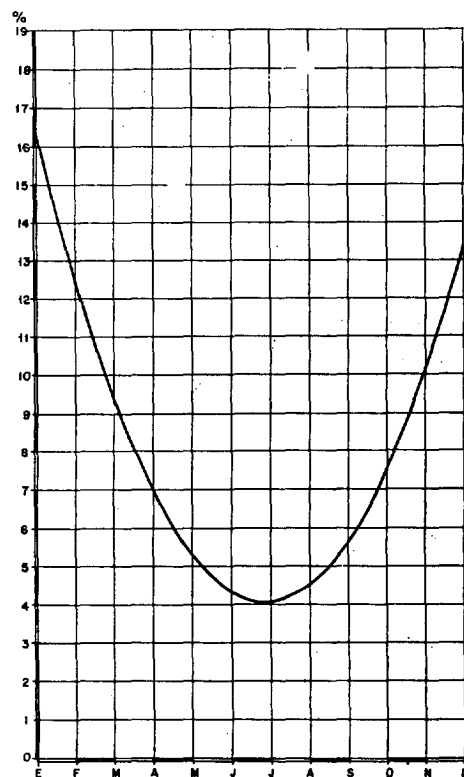


Figura 4.

junta, circunstancias ambas lógicas, dada la constitución de ambos tipos de unión y las tensiones de tracción que se derivan de este parámetro.

La representación gráfica de los modelos matemáticos hallados se expone en la figura 4. Su interés radica, no sólo en la confirmación de un hecho, ya conocido, sino en el establecimiento de unas leyes sencillas de previsión y evolución del fenómeno a lo largo de cada año, absolutamente válidas para la Administración española.

BIBLIOGRAFIA

LOSADA: "Estructura de la vía" (cuaderno n.º 2). ETS Ingenieros de Caminos, Madrid, 1987.

OBERWEILER: "Una aportación a la investigación teórica y al análisis experimental de carriles ferroviarios". Tesis doctoral, Múnich, 1973.

ORE: "Comité D 117: Adaptación óptima de la vía clásica al tráfico del futuro". Utrecht, 1973.



Luis Velilla Almaraz

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (especialidad Construcción), por la Universidad Politécnica de Madrid desde 1968.

Tesis Doctoral presentada por el Departamento de Ingeniería Civil-Transportes, de la Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica

de Madrid, en 1988, con la calificación de apto "cum laude".

Técnico jefe de vía al servicio de la Inspección General de Renfe, habiendo desempeñado anteriormente diversos puestos desde su ingreso en la Red en 1969.

Profesor de Topografía desde 1970, primero en la Escuela de Ingeniería Técnica de Obras Públicas y a partir de 1977 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

