

METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO DIAGNÓSTICO DE LA LÍNEA 12

Informe final



METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

FICHA DE IDENTIFICACIÓN

| | |
|---------------------------------|---|
| Contratante | Gobierno del Distrito Federal – Secretaria de Obras y Servicios |
| Proyecto | Metro de la Ciudad de México |
| Estudio | Diagnóstico de la Línea 12 |
| Naturaleza del documento | Informe final |
| Fecha | 29/08/2014 |
| Nombre del archivo | Informe final de análisis línea 12 |
| Referencia | MEX-S117-REP-0012-B |
| Confidencialidad | |
| Idioma del documento | Español |
| Número de páginas | 258 |

APROBACIÓN

| Versión | Nombre | Fonction | Fecha | Visa | Modificaciones |
|---------|--|--------------------------------|------------|------|--|
| 1 | Autores: Bernard Gautier Quentin Héraud Pierre Mansoz Alain Moutardier Nieves Penalba Pierre Sautjeau Philippe Vion | Expertos | 16/06/2014 | | Documento de trabajo |
| | Verificador: Serge Bourdin | Director de proyecto | 16/06/2014 | | |
| | Autorizado: Colás Martinet | Vice-Presidente América Latina | 17/06/2014 | | |
| 2 | Autores: Bernard Gautier Quentin Héraud Pierre Mansoz Alain Moutardier Nieves Penalba Pierre Sautjeau Philippe Vion | Expertos | 27/06/2014 | | Versión final |
| | Verificador: Serge Bourdin | Director de proyecto | 30/06/2014 | | |
| | Autorizado: Colás Martinet | Vice-Presidente América Latina | 30/06/2014 | | |
| 3 | Autores: Pierre Mansoz Nieves Penalba Pierre Sautjeau | Expertos | 29/08/2014 | | Versión final completada con el análisis de los resultados preliminares de pruebas |
| | Verificador: Serge Bourdin | Director de proyecto | 29/08/2014 | | |
| | Autorizado: Colás Martinet | Vice-Presidente América Latina | 29/08/2014 | | |

CONTENIDO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1. | INTRODUCCION | 16 |
| 1.1 | ALCANCE Y OBJETIVOS DE LA PRESTACIÓN EN SU ETAPA 1 | 16 |
| 2. | METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE LA LINEA 12 | 17 |
| 2.1 | LISTA DE ABREVIATURAS | 17 |
| 2.2 | LISTA TEXTOS REFERENCIALES | 17 |
| 2.2.1 | NORMAS EUROPEAS | 17 |
| 2.2.2 | NORMAS NORTEAMERICANAS | 18 |
| 2.2.3 | NORMAS UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER (UIC) | 18 |
| 2.2.4 | NORMAS FRANCESAS | 19 |
| 2.2.5 | OTROS TEXTOS DE REFERENCIA | 19 |
| 2.3 | METODOLOGÍA | 20 |
| 2.3.1 | ETAPA 1: ANÁLISIS | 20 |
| 2.3.2 | ETAPA 2: FORMULACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS | 21 |
| 3. | VIA FERREA | 22 |
| 3.1 | LISTA DE DOCUMENTOS SOLICITADOS Y RECIBIDOS | 22 |
| 3.1.1 | PLANOS ENTREGADOS POR EL CONSORCIO CONSTRUCTOR A PMDF | 22 |
| 3.1.2 | ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ENTREGADAS POR EL CONSORCIO CONSTRUCTOR A PMDF | 26 |
| 3.1.3 | PRUEBAS DE CALIDAD DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE VÍAS FÉRREAS ENTREGADAS POR EL CONSORCIO CONSTRUCTOR A PMDF | 29 |
| 3.2 | INSPECCIÓN VISUAL DE LA LÍNEA | 31 |
| 3.2.1 | CONSTATAIONES GENERALES LUEGO DE LA INSPECCIÓN VISUAL | 38 |
| 3.2.2 | EXAMEN DE LOS COMPONENTES DE LA VÍA FÉRREA | 39 |
| 3.2.2.1 | Rieles | 39 |
| 3.2.2.2 | Contra-riel en las curvas | 46 |
| 3.2.2.3 | Durmientes | 49 |
| 3.2.2.4 | Sistema de fijación | 54 |
| 3.2.2.5 | Balasto | 56 |
| 3.2.2.6 | Juntas aislantes pegadas | 60 |
| 3.2.2.7 | Aparatos de vía | 61 |
| 3.2.2.8 | Aparatos de dilatación | 61 |
| 3.2.2.9 | Nivelación | 62 |
| 3.2.3 | SÍNTESIS | 63 |
| 3.2.4 | INVESTIGACIONES COMPLEMENTARIAS | 64 |
| 3.3 | ANÁLISIS DEL TRAZADO DE VÍA | 66 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.3.1 | TRAZADO EN PLANTA | 66 |
| 3.3.1.1 | Radio mínimo y Longitud mínima de los elementos de curvas | 66 |
| 3.3.1.2 | Peralte máximo, insuficiencia de peralte, velocidad máxima | 69 |
| 3.3.2 | PERFIL LONGITUDINAL | 70 |
| 3.3.3 | VÍAS SECUNDARIAS Y VÍAS DE PATIO Y TALLERES | 70 |
| 3.3.4 | CORRECCIONES RECOMENDADAS | 71 |
| 3.3.4.1 | Conclusión | 73 |
| 3.4 | EXAMEN DE LOS COMPONENTES DE LA VÍA FÉRREA | 73 |
| 3.4.1 | RIELES | 73 |
| 3.4.1.1 | Conformidad en relación con el Especificaciones técnicas | 73 |
| 3.4.1.2 | Verificación del sistema calidad a través de la producción | 73 |
| 3.4.1.3 | Análisis de la realización de Largos Rieles Soldados (LRS) | 74 |
| 3.4.1.4 | Comentarios | 74 |
| 3.4.1.5 | Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis | 74 |
| 3.4.2 | DURMIENTES | 75 |
| 3.4.2.1 | Conformidad en relación con las especificaciones técnicas | 75 |
| 3.4.2.2 | Verificación del sistema calidad durante la producción | 75 |
| 3.4.2.3 | Análisis de la instalación de la vía | 76 |
| 3.4.2.4 | Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis | 76 |
| 3.4.3 | FIJACIONES | 76 |
| 3.4.3.1 | Conformidad en relación con Especificaciones técnicas | 76 |
| 3.4.3.2 | Verificación del sistema calidad a través de la producción | 76 |
| 3.4.3.3 | Análisis de la instalación de la vía | 77 |
| 3.4.3.4 | Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis | 77 |
| 3.4.4 | BALASTO | 77 |
| 3.4.4.1 | Calidad de la roca | 77 |
| 3.4.4.2 | Espesor puesto en obra | 78 |
| 3.4.4.3 | Granulometría | 78 |
| 3.4.4.4 | Dureza (ensayos LA y Micro-deval) | 80 |
| 3.4.4.5 | Comentarios en relación con las especificaciones técnicas | 80 |
| 3.4.4.6 | Verificación del sistema calidad de la cantera y controles a través de la producción | 80 |
| 3.4.4.7 | Conclusiones/riesgos | 80 |
| 3.4.4.8 | Acciones correctivas a poner en marcha | 81 |
| 3.4.5 | APARATOS DE VÍA | 81 |
| 3.4.5.1 | Conformidad en relación con especificaciones técnicas | 81 |
| 3.4.5.2 | Verificación del sistema calidad a través de la producción | 81 |
| 3.4.5.3 | Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis | 81 |
| 3.4.6 | CONTRA-RIEL | 82 |
| 3.4.6.1 | Conformidad con la especificación técnica | 82 |
| 3.4.6.2 | Verificación del sistema calidad a través de la producción | 82 |
| 3.4.6.3 | Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis | 82 |
| 3.4.6.4 | Conclusiones | 82 |
| 3.5 | EXAMEN DEL SISTEMA COMPLETO DE LA VÍA FÉRREA | 83 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.6 | ESTRUCTURA DE LA VÍA PROPUESTO PARA LAS CURVAS DE RADIO REDUCIDO | 83 |
| 4. | MATERIAL RODANTE | 85 |
| 4.1 | LISTA DE DOCUMENTOS SOLICITADOS Y RECIBIDOS | 85 |
| 4.2 | DIAGNÓSTICO | 88 |
| 4.2.1 | PARQUE DE TRENES | 88 |
| 4.2.2 | ESTADO DE LOS TRENES | 88 |
| 4.3 | ESTUDIOS DE LOS PARÁMETROS MATERIAL RODANTE INFLUYENTES SOBRE LA INTERFAZ RUEDA/RIEL | 91 |
| 4.3.1 | INTRODUCCIÓN | 91 |
| 4.3.2 | DISTANCIA ENTRE LAS CARAS INTERNAS (EI) DE LAS RUEDAS | 91 |
| 4.3.2.1 | Documentos de entrada | 91 |
| 4.3.2.2 | Comparación de los valores específicos al valor retenido por CAF | 91 |
| 4.3.2.3 | Comparación de la nominalización en vigor | 91 |
| 4.3.2.4 | Ensayos de validación de resultados | 92 |
| 4.3.2.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 92 |
| 4.3.2.5.1 | Metros de los tipos MF67 y MF77. | 92 |
| 4.3.2.5.2 | Trenes suburbanos de tipos MS61, MI79, MI84, y MI2N. | 92 |
| 4.3.2.5.3 | Metros de tipo MF88. | 92 |
| 4.3.2.6 | Puntos Difíciles / Riesgos | 93 |
| 4.3.3 | DISTANCIA ENTRE EJES DEL BOGIE | 93 |
| 4.3.3.1 | Documentos de entrada | 93 |
| 4.3.3.2 | Comparación valor especificado y valor retenido por CAF | 93 |
| 4.3.3.3 | Comparación de la nominalización en vigor | 93 |
| 4.3.3.4 | Ensayo de validación y resultados | 94 |
| 4.3.3.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 94 |
| 4.3.3.5.1 | Metros de tipo MF77. | 94 |
| 4.3.3.5.2 | Trenes suburbanos de tipo Z20500. | 94 |
| 4.3.3.5.3 | Trenes suburbanos de tipo MI2N. | 94 |
| 4.3.3.5.4 | Metros de tipo FM86, FM95A, FE07. | 94 |
| 4.3.3.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 94 |
| 4.3.3.7 | Plan de acciones | 94 |
| 4.3.4 | DISTANCIA ENTRE LOS EJES DE LA CAJA | 95 |
| 4.3.4.1 | Documentos de entrada | 95 |
| 4.3.4.2 | Comparación valor especificado y valor retenido por CAF. | 95 |
| 4.3.4.3 | Comparación la normalización en vigor | 95 |
| 4.3.4.4 | Ensayo de validación y resultados | 95 |
| 4.3.4.5 | Valores utilizados sobre de los materiales similares | 95 |
| 4.3.4.5.1 | Metros de tipo MF77. | 95 |
| 4.3.4.5.2 | Trenes suburbanos de tipo Z20500. | 95 |
| 4.3.4.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 95 |
| 4.3.4.7 | Plan de acciones | 96 |
| 4.3.5 | PERFIL DE LA RUEDA | 96 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| 4.3.5.1 | Documentos de entrada | 96 |
| 4.3.5.2 | Comparación del valor especificado y valor retenido por CAF | 96 |
| 4.3.5.3 | Comparación la normalización en vigor | 97 |
| 4.3.5.4 | Ensayo de validación y resultados | 97 |
| 4.3.5.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 97 |
| 4.3.5.5.1 | Metros de tipos MF67 y MF77. | 97 |
| 4.3.5.5.2 | Trenes suburbanos de tipos MS61, MI79, MI84, y MI2N. | 97 |
| 4.3.5.5.3 | Metros de tipo MF88. | 97 |
| 4.3.5.5.4 | Metros de tipo FM86, FM95A, FE07. | 98 |
| 4.3.5.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 98 |
| 4.3.5.7 | Plan de acciones | 98 |
| 4.3.6 | CONICIDAD EQUIVALENTE | 99 |
| 4.3.6.1 | Documentos de entrada | 99 |
| 4.3.6.2 | Comparación valor especificado y valor retenido por CAF | 99 |
| 4.3.6.3 | Comparación a la normalización en vigor | 99 |
| 4.3.6.4 | Ensayo de validación y resultados | 99 |
| 4.3.6.4.1 | Explicación de la nota de cálculo en recta : | 100 |
| 4.3.6.4.2 | Explicación de la nota de cálculo en curvas: | 100 |
| 4.3.6.4.2.1 | Referencias: | 100 |
| 4.3.6.4.2.2 | Explicación de los gráficos de la nota de cálculo: | 101 |
| 4.3.6.4.3 | Aplicación al trazado de la línea 12: | 102 |
| 4.3.6.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 104 |
| 4.3.6.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 104 |
| 4.3.6.7 | Plan de acciones | 104 |
| 4.3.7 | DIÁMETRO DE LA RUEDA | 105 |
| 4.3.7.1 | Documentos de entrada | 105 |
| 4.3.7.2 | Comparación del valor especificado y valor retenido por CAF | 105 |
| 4.3.7.3 | Comparación la normalización en vigor | 105 |
| 4.3.7.4 | Ensayo de validación y resultados | 105 |
| 4.3.7.5 | Valores utilizados en materiales similares | 105 |
| 4.3.7.5.1 | Metros de tipo MF67 y MF77. | 106 |
| 4.3.7.5.2 | Trenes suburbanos de tipo MS61, MI79, MI84, y MI2N. | 106 |
| 4.3.7.5.3 | Metros de tipo MF88. | 106 |
| 4.3.7.5.4 | Metros de tipo FM86, FM95A, FE07. | 106 |
| 4.3.7.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 106 |
| 4.3.7.7 | Plan de acciones | 106 |
| 4.3.8 | HMAX Y Y/Q EN DINÁMICA | 107 |
| 4.3.8.1 | Documentos de entrada | 107 |
| 4.3.8.2 | Comparación valor especificado y valor retenido por CAF | 107 |
| 4.3.8.3 | Comparación la normalización en vigor | 107 |
| 4.3.8.4 | Ensayo de validación y resultados | 107 |
| 4.3.8.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 108 |
| 4.3.8.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 108 |
| 4.3.8.7 | Plan de acciones | 108 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 4.3.9 | Y/Q CASI ESTÁTICO | 109 |
| 4.3.9.1 | Documentos de entrada | 109 |
| 4.3.9.2 | Comparación valor especificados y valor retenido por CAF | 109 |
| 4.3.9.3 | Comparación la normalización en vigor | 109 |
| 4.3.9.4 | Ensayo de validación y resultados | 109 |
| 4.3.9.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 109 |
| 4.3.9.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 109 |
| 4.3.9.7 | Plan de acciones | 109 |
| 4.4 | ESTUDIOS DE LAS FUNCIONES AUXILIARES EN INTERFAZ CON EL CONTACTO RUEDA/RIEL | 110 |
| 4.4.1 | FUNCIÓN ANTIBLOQUEO | 110 |
| 4.4.1.1 | Documentos de entrada | 110 |
| 4.4.1.2 | Comparación valor especificado y valor retenido por CAF | 110 |
| 4.4.1.3 | Comparación la normalización en vigor | 110 |
| 4.4.1.4 | Ensayo de validación y resultados | 110 |
| 4.4.1.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 110 |
| 4.4.1.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 111 |
| 4.4.1.7 | Plan de acciones | 111 |
| 4.4.2 | FUNCIÓN ANTI-PATINAJE | 112 |
| 4.4.2.1 | Documentos de entrada | 112 |
| 4.4.2.2 | Comparación valor especificado y valor retenido por CAF | 112 |
| 4.4.2.3 | Comparación la normalización en vigor | 112 |
| 4.4.2.4 | Ensayos de validación y resultados | 112 |
| 4.4.2.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 112 |
| 4.4.2.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 112 |
| 4.4.2.7 | Plan de acciones | 113 |
| 4.4.3 | FUNCIÓN LUBRICACIÓN | 114 |
| 4.4.3.1 | Documentos de entrada | 114 |
| 4.4.3.2 | Comparación valor especificado y valor retenido por CAF | 115 |
| 4.4.3.3 | Estudios detallados del sistema de lubricación. | 115 |
| 4.4.3.3.1 | Relación de generalidades emitidas en la NF EN 15427+A1 | 115 |
| 4.4.3.3.2 | Relación de los principios de concepción | 115 |
| 4.4.3.3.3 | Comparación con la concepción del sistema de lubricación de FE10 | 117 |
| 4.4.3.3.4 | Utilización del sistema de lubricación | 121 |
| 4.4.3.3.4.1 | Cantidades y tiempos de eyección | 121 |
| 4.4.3.3.4.2 | Evolución del funcionamiento del sistema de lubricación | 121 |
| 4.4.3.3.4.3 | Diagnóstico de las zonas de lubricación. | 122 |
| 4.4.3.4 | Ensayo de validación y resultados | 123 |
| 4.4.3.5 | Valores utilizados sobre los materiales similares | 123 |
| 4.4.3.6 | Puntos difíciles / Riesgos | 123 |
| 4.4.3.7 | Plan de acciones | 123 |
| 5. | OBRAS CIVILES EN EL TRAMO ELEVADO | 125 |
| 5.1 | ANÁLISIS DE LAS OBRAS EXISTENTES | 125 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.1.1 | DESCRIPCIÓN | 125 |
| 5.1.2 | DOCUMENTACIÓN RECIBIDA | 126 |
| 5.2 | EVALUACIÓN POR EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE AMPLIACIÓN DINÁMICO DE LAS DIFERENTES OBRAS | 127 |
| 5.2.1 | TRABE DE CONCRETO CON COLUMNA EN CONCRETO | 128 |
| 5.2.2 | TRABE COMPUESTA CON 2 VÍAS | 135 |
| 5.2.3 | TRABES COMPUESTAS (DOS PARALELAS) CON UNA VÍA | 139 |
| 5.2.4 | TRABE DE CONCRETO EN U CON CAJÓN | 141 |
| 5.2.5 | CONCLUSIÓN SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LOS TRABES | 143 |
| 5.3 | INSPECCIÓN DE LAS OBRAS | 144 |
| 5.3.1 | CONSTATAIONES GENERALES | 144 |
| 5.3.2 | EXAMEN DE LAS OBRAS Y PRINCIPALES DEFECTOS | 144 |
| 5.3.2.1 | Problema de drenaje y fugas | 144 |
| 5.4 | VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE LOS DURMIENTES PRETENSADOS | 150 |
| 5.5 | FISURAS MALLADAS DE LOS DURMIENTES EN CONCRETO | 150 |
| 5.6 | GRIETAS DE LAS VIGAS EN CONCRETO | 151 |
| 6. | ANÁLISIS DEL MANTENIMIENTO DE VÍA Y MATERIAL RODANTE | 152 |
| 6.1 | ANÁLISIS DEL DOCUMENTO DE MANTENIMIENTO DE LA VÍA FÉRREA (MANUAL DE MANTENIMIENTO) | 152 |
| 6.1.1 | RECEPCIÓN DE LAS OBRAS Y MANTENIMIENTO REALIZADO | 153 |
| 6.1.2 | CRÍTICAS Y MEDIDAS CORRECTIVAS | 154 |
| 6.2 | MANTENIMIENTO DEL MATERIAL RODANTE | 154 |
| 6.2.1 | EVOLUCIONES DE LOS PERFILES DE LAS RUEDAS. | 154 |
| 6.2.2 | CONCLUSIONES SOBRE EL MANTENIMIENTO. | 162 |
| 7. | ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES Y DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS | 163 |
| 7.1 | VIBRACIONES DE LOS EJES | 163 |
| 7.1.1 | ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES | 163 |
| 7.1.2 | ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS | 164 |
| 7.2 | ESTUDIO DE NUEVAS CONFIGURACIONES PERFILES/PERALTES/SUSPENSIONES | 168 |
| 7.2.1 | SIMULACIONES | 168 |
| 7.2.1.1 | Hipótesis | 168 |
| 7.2.1.2 | Análisis de los resultados de simulaciones | 170 |
| 7.2.1.2.1 | Análisis de la influencia de los perfiles y de los peraltes en el paso de curvas de 200m | 170 |
| 7.2.1.2.2 | Análisis de la influencia de las suspensiones primeras en el paso de curvas de 200 m | 173 |
| 7.2.1.2.3 | Análisis de la influencia de la distancia entre eje de los bogíes de curvas de 200 m | 173 |
| 7.2.2 | ENSAYOS | 173 |
| 7.2.2.1 | Análisis del comportamiento del FE10 (configuración original) | 173 |
| 7.2.2.1.1 | Hipótesis de la Auditoría | 173 |
| 7.2.2.1.2 | Cinemática del bogí en curva (situación nominal) | 173 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 7.2.3 | DINÁMICA DEL BOGÍ EN CURVA (SITUACIÓN NOMINAL) | 178 |
| 7.3 | ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CONFIGURACIONES ENSAYADAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO EN CURVA | 180 |
| 7.3.1 | OBJETIVO DE LOS ENSAYOS Y DE LOS PARÁMETROS A MEDIR | 180 |
| 7.3.2 | IMPACTO DEL PERFIL SOBRE EL COMPORTAMIENTO EN CURVA | 180 |
| 7.3.3 | CONSECUENCIAS DE LA LUBRICACIÓN EN EL CRUCE DE LOS APARATOS DE VÍA | 183 |
| 7.3.3.1 | Síntesis de los resultados | 185 |
| 7.3.3.1.1 | Conclusión de los ensayos sobre el aspecto vibratorio | 185 |
| 7.3.3.1.2 | Conclusión de los ensayos desde el punto de vista del comportamiento cinemático y dinámico en curvas | 185 |
| 7.3.3.1.3 | Conclusión sobre la validación de los modelos de simulación y de la influencia de las configuraciones ensayadas en el comportamiento en curva | 185 |
| 8. | CONCLUSIONES | 186 |
| 8.1 | RESUMEN DE LAS CAUSAS | 186 |
| 8.1.1 | AL NIVEL DE LA VÍA | 186 |
| 8.1.1.1 | Causas en la planeación y diseño | 186 |
| 8.1.1.2 | Puesta en obra de la vía | 186 |
| 8.1.1.3 | Calidad de los componentes de la vía | 187 |
| 8.1.1.4 | Mantenimiento de la vía | 187 |
| 8.1.2 | AL NIVEL DEL MATERIAL RODANTE | 187 |
| 8.1.2.1 | Defectos de diseño de los trenes | 187 |
| 8.1.2.2 | Defectos de mantenimiento de los trenes | 188 |
| 8.1.3 | AL NIVEL DE LA OPERACIÓN | 188 |
| 8.1.3.1 | Defectos de diseño | 188 |
| 8.1.3.2 | Reducciones de velocidades | 188 |
| 8.1.3.3 | Mal funcionamiento del sistema de lubricación | 188 |
| 8.1.3.4 | Rotación de los trenes | 188 |
| 8.2 | SÍNTESIS DEL DIAGNÓSTICO | 189 |
| 8.3 | ACCIONES CORRECTIVAS | 190 |
| 9. | ANEXOS | 191 |
| 9.1 | ANEXO: NORMA BALASTO | 192 |
| 9.2 | ANEXO: NORMA LUBRICACION | 193 |
| 9.3 | ANEXO: NORMA PERFIL DE RUEDA | 194 |



INDICE DE LAS FIGURAS

| | | |
|------------|--|-----|
| Figura 1. | Principio del “Ciclo en V” | 20 |
| Figura 2. | Esquema de bateo mecánico | 64 |
| Figura 4. | Système VIPA | 84 |
| Figura 5. | Contacto riel/rueda en alineación | 100 |
| Figura 6. | Diferencia G/D de la distancia a recorrer en las curvas | 100 |
| Figura 7. | Contacto riel/rueda en curvas de radios pequeños “a la derecha” | 101 |
| Figura 8. | Diferencia de radios G/D en función del desplazamiento transversal | 101 |
| Figura 9. | Desplazamiento del punto de contacto en función a los movimientos transversales del eje. | 102 |
| Figura 10. | Análisis del desplazamiento de los ejes en las curvas de 200m | 103 |
| Figura 11. | Zonas de una superficie de rodamiento | 116 |
| Figura 12. | Alineación de la unidad de aplicación de lubricante sobre la pestaña de la rueda | 116 |
| Figura 13. | Zonas de una superficie de rodamiento | 117 |
| Figura 14. | Preconización del proveedor para la fijación del sistema de lubricación. | 118 |
| Figura 15. | Montaje del sistema de lubricación realizado por CAF. | 118 |
| Figura 16. | Punto de eyección del lubricante | 119 |
| Figura 17. | Ubicación del sistema de lubricación del FE10 | 120 |
| Figura 18. | Desequilibrio posible en las curvas de radios pequeños | 120 |
| Figura 19. | Cargas vivas (Tren normal y tren de mantenimiento) | 127 |
| Figura 20. | Sección de trabe de concreto con columna en concreto | 128 |
| Figura 21. | Modelo de cálculo: L 30 m en línea recta | 128 |
| Figura 22. | Modelo de cálculo: L 25m en curva con radio R = 200 m | 129 |
| Figura 23. | Sección tipo en línea recta de trabe compuesta con 2 vías | 135 |
| Figura 24. | Esquema-referencia de desplazamientos y rotaciones | 136 |
| Figura 25. | Sección tipo en curva de trabes compuestas (dos paralelas) con una vía | 139 |
| Figura 26. | Esquema-referencia de desplazamientos y rotaciones | 140 |
| Figura 27. | Sección tipo de trabe de concreto en U con cajón | 141 |
| Figura 28. | Esquema-referencia de desplazamientos y rotaciones | 141 |
| Figura 29. | Representación del ancho de la pestaña y del Qr. | 154 |
| Figura 30. | Evolución en Km del ancho de pestana: Unidad 7 | 155 |
| Figura 31. | Evolución por fecha del ancho de pestana: Unidad 7 | 156 |
| Figura 32. | Evolución por Km del Qr: Unidad 7 | 157 |
| Figura 33. | Evolución por fecha del Qr: Unidad 7 | 158 |
| Figura 34. | Histórico de la problemática en los ejes | 159 |
| Figura 35. | Flexión del Eje | 164 |
| Figura 36. | Primer eje – rueda derecha | 166 |
| Figura 37. | Primer eje – rueda derecha | 167 |

INDICE DE LAS TABLAS

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabla 1. | Lista de abreviaturas | 17 |
| Tabla 2. | Lista textos referenciales-Europa | 18 |
| Tabla 3. | Lista textos referenciales-USA | 18 |
| Tabla 4. | Lista textos referenciales-UIC | 19 |
| Tabla 5. | Lista textos referenciales-Francesas | 19 |
| Tabla 6. | Lista textos referenciales | 19 |
| Tabla 7. | Lista de documentos Vía - Planos | 26 |
| Tabla 8. | Lista de documentos Vía -Especificación Técnica | 28 |
| Tabla 9. | Lista de documentos Vía - Pruebas de calidad | 30 |
| Tabla 10. | Resumen de las curvas de radio inferior a 380 m donde existen elementos de trazo que no cumplen la longitud mínima exigida: | 67 |
| Tabla 11. | Incoherencias en los valores del peralte práctico respecto al método de cálculo preconizado | 70 |
| Tabla 12. | Lista de curvas que concierne la reducción de peralte | 72 |
| Tabla 14. | Lista de documentos Material Rodante | 88 |
| Tabla 15. | Hipótesis de cálculo: L 30 m en línea recta | 136 |
| Tabla 16. | Hipótesis de cálculo: L 25m en curva | 136 |
| Tabla 17. | Hipótesis de cálculo: L 25m en curva | 139 |
| Tabla 18. | Hipótesis de cálculo: L 25m en curva | 141 |
| Tabla 19. | Combinaciones riel/rueda a simular informáticamente | 169 |
| Tabla 20. | 170 | |

INDICE DE LAS FOTOS

| | | |
|----------|--|----|
| Foto 1. | Head-checking vía 2 PK 12,213, cerca de Estación Periférico Oriente | 39 |
| Foto 2. | Desgaste ondulatorio de amplitud 6-7 cm vía 2 PK 10,905 | 40 |
| Foto 3. | Profundidad de 0,5 mm vía 1 PK 11,780 | 40 |
| Foto 4. | Rastros de movimiento transversal de la rueda por deslizamiento en vía 2 en PK 12,52041 | 41 |
| Foto 5. | Rebabas en el exterior del carril de la fila alta sobre vía 2 al PK 15,320 | 41 |
| Foto 6. | Fisuras transversales sobre el hongo sobre vía en el PK 10,885 | 42 |
| Foto 7. | Rodadura fila izquierda y derecha PK 9,400 vía 1 | 43 |
| Foto 8. | Soldadura vía 1 - PK 9,710 | 44 |
| Foto 9. | Soldadura PK 6,515 vía 1 | 44 |
| Foto 10. | Soldadura PK 16,820 vía 2 | 45 |
| Foto 11. | Soldadura angulosa en la fila baja de la vía 2 curva 12 | 45 |
| Foto 12. | Contra-riel de la curva 27 vía 2 | 46 |
| Foto 13. | Trazas de fricción (zona activa del contra-riel) comprendido entre el 3° y el 6° soporte (curva 27) | 47 |
| Foto 14. | Brida de fijación del contra-riel aflojada en PK 16,900 | 48 |
| Foto 15. | Apoyo del contra-riel sobre 3 mm en extremo del soporte (curva 3) | 49 |
| Foto 16. | Durmientes con moldeado lateral anormal en PK 7,020 | 50 |
| Foto 17. | Durmiente roto en PK 11,704 vía 2 | 50 |
| Foto 18. | Durmiente agrietada longitudinalmente en PK 16,848 | 51 |
| Foto 19. | Durmiente agrietada transversalmente en PK 6,985 | 51 |
| Foto 20. | Traviesa agrietada en el centro en el PK 16,848 vía 1 | 52 |
| Foto 21. | Balasto incrustado en el hormigón de la durmiente en PK 4,765 vía 1 (antes de desguarnecido) | 52 |
| Foto 22. | Cabeza del durmiente en PK 4,765 vía 1 (Después de desguarnecido) | 52 |
| Foto 23. | Fijación Nabra agrietada en PK 8,250 | 54 |
| Foto 24. | Fijación Nabra rotas en PK 11,780 | 54 |
| Foto 25. | Fijación faltante en el PK 4,975 (con funda obstruida) | 55 |
| Foto 26. | Fijación colocada con dos láminas de resorte en el PK 4,985 | 55 |
| Foto 27. | Balasto de tipo diferente en PK 9,030 | 56 |
| Foto 28. | Diferencia de desgaste entre un elemento de origen basáltico y un elemento de origen calcáreo en PK 10,800 | 57 |
| Foto 29. | Balasto redondeado por el movimiento (oscilación vertical) de los durmiente en PK 10,800 vía 1 | 57 |
| Foto 30. | Balasto bajo durmiente contaminado por finos y que retienen la humedad en PK 4,765 vía 1 | 57 |
| Foto 31. | Contaminación por arcilla en estación de Tlahuac | 58 |
| Foto 32. | Elementos finos en el balasto PK 6,015 vía 2 | 58 |
| Foto 33. | Granulometría demasiado pequeña PK 5,055 | 59 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Foto 34. | Juntas aislante pegadas con durmientes centrales inestables PK 16,490 vía 1 | 60 |
| Foto 35. | Junta aislante con rastro sobre la brida en la estación de Tlahuac | 60 |
| Foto 36. | Aguja mellada en estación de Tlahuac | 61 |
| Foto 37. | Defectos de nivelación en curva 7 | 62 |
| Foto 38. | Defectos de nivelación en curva 10 vía 2 en respuesta a sustitución de durmientes | 63 |
| Foto 39. | Pestaña cortada / qR débil | 89 |
| Foto 40. | Desgaste anormal de la cara interna | 90 |
| Foto 41. | Ejemplo del sistema de eyección de lubricante de la SNCF | 124 |
| Foto 42. | Trabe compuesta con columna en hormigón | 125 |
| Foto 43. | Trabes compuestas paralelas con columna en acero | 125 |
| Foto 44. | Trabes de hormigón en doble U con columna en hormigón | 126 |
| Foto 45. | Trabe de concreto en U con cajón y columna en hormigón | 126 |
| Foto 46. | Problema de drenaje entre dos tramos | 145 |
| Foto 47. | Drenaje con un tubo debajo de la losa | 145 |
| Foto 48. | Anclaje de poste de catenaria debajo de la losa | 146 |
| Foto 49. | Variación de color del concreto no uniforme sobre vigas y tabletas | 146 |
| Foto 50. | Fisuras del concreto y del mortero de sellado | 147 |
| Foto 51. | Calidad de los sellados de mortero en la extremidad de los capiteles | 147 |
| Foto 52. | Irregularidad de geometría de los segmentos y tramos prefabricados | 148 |
| Foto 53. | Flecha excesiva de un tramo y una rotación de la extremidad | 148 |
| Foto 54. | Patín inferior con acero quebrantado | 149 |
| Foto 55. | Fisura mallada de un durmiente de concreto | 151 |
| Foto 56. | Piezas de madera para sostener la vía en posición, PK 11,735 | 153 |

1. INTRODUCCION

La línea 12 del metro de la Ciudad de México fue abierta al público el 30 de octubre del 2012 y es operada con material rodante de tipo ferroviario construido por CAF.

La línea 12 se localiza al sur de la Ciudad de México con dirección Este-Oeste. Tiene una longitud total de vía de 24.5 km, de los cuales 20.28 km son utilizados para servicio de pasajeros, y 11 km corren por viaducto elevado de Zapotitlán a Culhuacán.

Durante la etapa de realización de pruebas previa a la puesta en servicio de la Línea, se empezó a detectar un desgaste ondulatorio prematuro en algunas zonas de curva. Ya en operación, se empezaron a observar fallas estructurales de la vía, al presentarse en el sistema piezas dañadas (durmientes, fijaciones del riel, ruptura de fijaciones de aparatos de dilatación) y una generalización del desgaste ondulatorio del riel en curvas acompañado de desgaste anormal de las ruedas de los trenes que afectaron al funcionamiento y la seguridad de la operación de la Línea. Por todo ello, el 12 de marzo del 2014 el servicio de pasajeros fue suspendido entre las estaciones Tláhuac y Atlalilco.

En este contexto, la Secretaria de Obras y Servicios del GDF solicitó una prestación a SYSTRA con el fin de conocer las causas y dar solución a la problemática presentada en la Línea 12.

La prestación de SYSTRA comprende 4 fases:

Etapa 1: Auditoría mediante plano de investigación en “V”

Etapa 2: Formulación de medidas correctivas

Etapa 3: Elaboración del proyecto ejecutivo de las correcciones a implementar

Etapa 4: Asistencia técnica a la puesta en ejecución de las acciones correctivas

1.1 Alcance y objetivos de la prestación en su etapa 1

La prestación de servicios solicitada a SYSTRA en la etapa 1 es una misión de asistencia a la Secretaria de Obras y Servicios para conocer las causas y poder dar solución (en las etapas 2 y 3) a las fallas de la línea 12. En este contexto, SYSTRA implementó un plan de análisis de las fallas al nivel de las infraestructuras elevadas (viaducto) y las curvas de entrada al taller, así como de los trenes.

Para ello, SYSTRA se ha apoyado en:

- La información del Proyecto proporcionada por la Secretaría de Obras y Servicios
- Los informes y estudios de TSO
- Análisis y Estudios propios

Este Informe de Diagnóstico da cumplimiento a la **etapa 1: Auditoría mediante plano de investigación en “V”** y tiene por objetivo dar a conocer las causas de las fallas y así, en las etapas 2 y 3, formular las medidas correctivas.

2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE LA LINEA 12

2.1 Lista de abreviaturas

| | |
|-------|---|
| Arema | Norma norteamericana |
| CR | Contra-riel |
| EN | Norma europea |
| JAP | Junta aislante pegada |
| LRS | Largos rieles soldados |
| MR | Material rodante |
| PK | Placa kilométrica |
| PMDF | Proyecto Metro Distrito Federal |
| SA | Soldadura aluminotérmica |
| STC | Sistema de Transporte Colectivo - DF |
| UCI | Union internationale des chemins de fer |

Tabla 1. Lista de abreviaturas

2.2 Lista textos referenciales

2.2.1 Normas Europeas

| | |
|-----------------|---|
| EN 1 997-1 | Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales - |
| EN 1 997-2 | Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 2 : reconnaissance des terrains et essais |
| EN 13 146-1 à 9 | Méthode d'essai pour les systèmes de fixation |
| EN 13 230 1-2-5 | Traverses béton monobloc |
| EN 13 231-1 à 8 | Travaux de voie ballastée - Qualité géométrique de la voie |
| EN 13 232-1 à 6 | Appareils de voie |
| EN 13 232-8 | Appareils de dilatation |
| EN 13 450 | Granulats pour ballast Voies Ferrées |
| EN 13 481-1 à 7 | Systèmes de fixation |
| EN 13 502 | Conicité équivalente |
| EN 13 674-1 | Rails Vignole de masses supérieure ou égale à 46kg/m |
| EN 13 674-3 | Contre Rails |
| EN 13 803-1 | Paramètres de conception du tracé de la voie – Voie courante |
| EN 13 848-5 | Evaluation de la qualité géométrique de la voie |
| EN 14730-1-2 | Soudure Aluminothermique |
| EN 13715 | Railway applications. Wheelsets and bogies. Wheels. Tread profile |
| EN 14363 | Railway applications. Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Testing of running behavior and stationary tests |
| EN 50215 | Railway applications. Rolling stock. Testing of rolling stock on completion of construction and before entry into service |

| | |
|-------------|--|
| EN 15427+A1 | Railway applications. Wheel/rail friction management. Flange lubrication |
|-------------|--|

Tabla 2. Lista textos referenciales-Europa

2.2.2 Normas Norteamericanas

| | |
|---|-------------|
| Arema 1997 Volume 1 Track – Chapter 1 Roadway & ballast | 2 - Ballast |
| Arema 2003 Volume 1 Track – Chapter 4 | Rails |

Tabla 3. Lista textos referenciales-USA

2.2.3 Normas Union internationale des chemins de fer (UIC)

| UIC leaflet | Title |
|-------------|--|
| 406 | Capacity |
| 433 | Standard General Conditions (SGC) for the introduction into service and operation of privately owned wagons |
| 453 | Procedures for air brake tests effected with a powered unit – Provisions concerning international trains |
| 500 | Standardisation of transport stock and components. Principles, procedures, results |
| 505-1 | Railway transport stock – Rolling stock construction gauge |
| 506 | Rules governing application of the enlarged GA, GB, GB1, GB2, GC and GI3 gauges |
| 510-2 | Trailing stock: wheels and wheelsets. Conditions concerning the use of wheels of various diameters |
| 511 | Trailing stock – Wheelbase |
| 518 | Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality |
| 541-08 | Brakes – Regulations concerning manufacture of the different brake parts : Derailment detectors for wagons |
| 541-1 | Brakes – Regulations concerning the design of brake components |
| 541-5 | Brakes – Electropneumatic brake (ep brake) – Electropneumatic emergency brake override (EBO) |
| 544-1 | Brakes – Braking power |
| 544-2 | Conditions to be observed by the dynamic brake of locomotives and motor coaches so that the extra braking effort produced can be taken into account for the calculation of the braked-weight |
| 567 | General provisions for coaches |
| 600 | Electric traction with aerial contact line |
| 608 | Conditions to be complied with for the pantographs of tractive units used in international services |
| 615-0 | Tractive units – Bogies and running gear – General provisions |
| 615-1 | Tractive units – Bogies and running gear – General conditions applicable to component parts |
| 710 | Minimum track gauge in curves |
| 715-1 | Application of digital track geometry analysis to the planning of tamping and lining/levelling work |
| 715-2 | Recommendations for management of rails |
| 716 | Maximum permissible wear profiles for switches |
| 730-3 | Automatic warning of track maintenance gangs |

| | |
|---------------|---|
| 732 | Principles for signaling trains routes using wayside signals |
| 774-1 | Recommendations for the fatigue design of railway bridges in reinforced and prestressed-concrete |
| 774-3 | Track - bridge Interaction. Recommendations for calculations |
| 794-1 | Pantograph/overhead line interaction for DC - electrified railway lines |
| 813 | Technical specification for the supply of wheelsets for tractive and trailing stock - Tolerances and assembly |
| UIC ORE S1002 | Standardisation of wheel profile |

Tabla 4. Lista textos referenciales-UIC

2.2.4 Normas francesas

| | |
|----------------|--|
| NF-F-03-402 | Railway transport equipment. Wheel sets for standard gauge rolling stock. Theoretical wheel profile V of 135 mm. |
| PR NF-P-18-545 | Granulats - Éléments de définition, conformité et codification |
| IN-0227 | Aparatos de dilatación para largo riel soldado |

Tabla 5. Lista textos referenciales-Francesas

2.2.5 Otros textos de referencia

| | |
|---|--|
| ICA-ALSTHOM-CARSO | Especificación técnica para la ejecución de soldaduras aluminotérmicas en los rieles |
| ICA-ALSTHOM-CARSO | Especificación técnica para la liberación de esfuerzos en largo riel soldado |
| ICA-ALSTHOM-CARSO | Manual de mantenimiento de aparatos de dilatación y aparatos de cambio de vía |
| ICA-ALSTHOM-CARSO | Instrucción técnica para la realineación y renivelación de las vías principales sobre balasto |
| ICA-ALSTHOM-CARSO | Instrucción técnica para la ejecución de los trabajos de vías |
| TSO | Informe de control de las soldaduras Línea 12 México |
| TSO | Informe preliminar de TSO Sobre el diagnóstico de la Línea 12 Bajo el contrato DGOP-AD-L-3-001-14 Control de desgaste de Aparatos de Vía |
| RAILTECH | Explicación técnica específica de soldadura aluminotérmica. Procedimiento PLA |
| PMDf-09-VI.8-612000-III_0023-02853-E-00 | Instrucción técnica para la ejecución de los trabajos de vía |

Tabla 6. Lista textos referenciales

2.3 Metodología

El estudio está dividido en dos etapas principales:

2.3.1 Etapa 1: Análisis

Con el objetivo de identificar las causas de las problemáticas encontradas en la línea 12, SYSTRA ha redactado un plan de investigación en 4 fases basado en el principio del “Ciclo en V”, al cual le integra un análisis de las conclusiones de los análisis ya realizadas o en fase de realización.

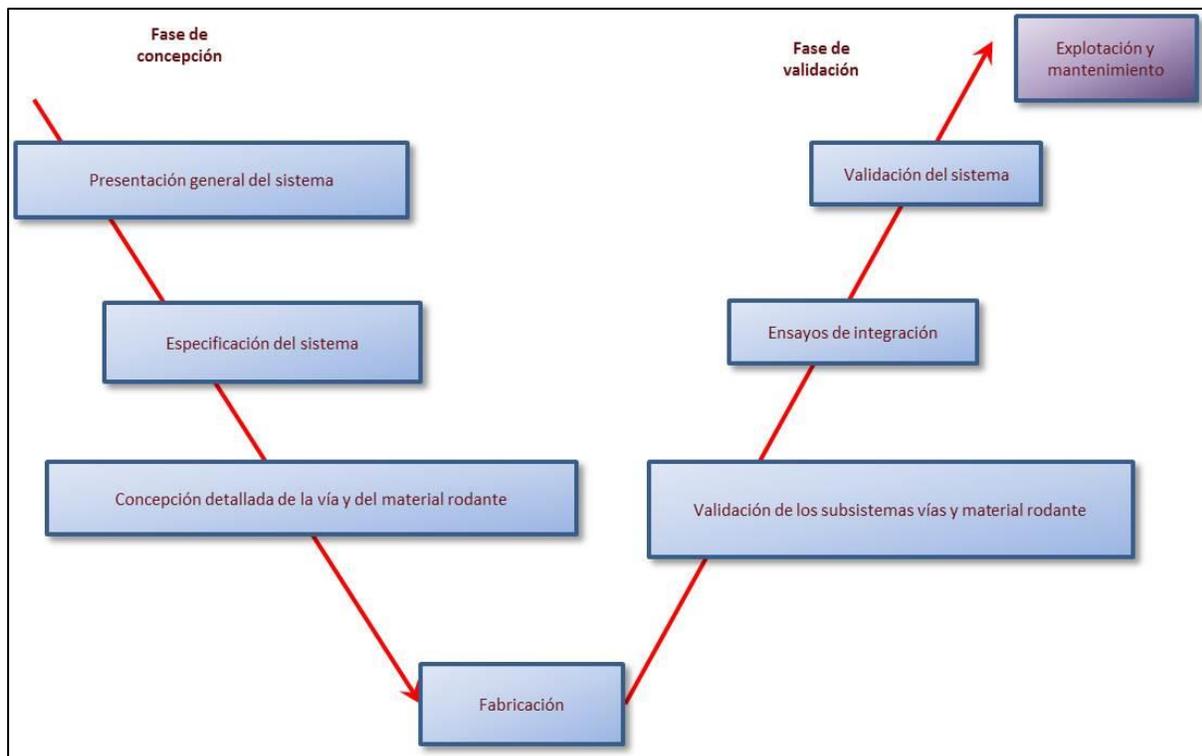


Figura 1. Principio del “Ciclo en V”

En este sentido, el análisis de SYSTRA es realizado según el plan siguiente:

Fase 1: Recopilación de las especificaciones técnicas y análisis de los diseños

- Análisis de los documentos de concepción general del sistema de la línea 12 (especificaciones funcionales y técnicas).
- Análisis de estudios de diseño realizados (ingeniería básica).
- Análisis de los documentos de concepción detallada de los subsistemas viaducto, vía y material rodante (proyecto ejecutivo).
 - SYSTRA está dedicando una atención particular a la verificación del respeto de las reglas de concepción, especialmente la toma en cuenta de las interfaces entre los dos subsistemas vía y material rodante y entre los dos subsistemas vía y viaducto.

Fase 2: Validación de la realización “in situ”

SYSTRA realizó análisis in situ de la vía, del viaducto y del material rodante, con el fin de verificar su conformidad con respecto a los documentos de especificaciones técnicas. También utilizó el levantamiento topográfico realizado por la empresa TSO así como los análisis de la calidad del balasto, de los durmientes y de las fijaciones realizados por un laboratorio de la SNCF.

Fase 3: Recopilación de los datos de validación de los sistemas instalados

- Análisis de los documentos de validación de los subsistemas viaducto, vía y material rodante.
 - SYSTRA dedicó una especial atención a la verificación de los ensayos que han permitido validar el rendimiento esperado de las interfaces de estos tres subsistemas.
- Análisis de los documentos de validación de la integración de los tres subsistemas.

Fase 4: Evaluación de las condiciones operacionales

SYSTRA auditó la organización implementada para el respeto de las condiciones de operación y de mantenimiento nominal. Para ello, se tomó conocimiento de los manuales de operación y mantenimiento.

El presente informe presenta los resultados de esta etapa de análisis de las fallas de la Línea 12.

2.3.2 Etapa 2: Formulación de acciones correctivas

SYSTRA, basándose en la identificación de los orígenes de los defectos, ya sean identificados como defectos de concepción, defectos de realización o de mantenimiento, formulará un conjunto de recomendaciones. SYSTRA incluirá en este análisis los subsistemas “catenaria” y “aparatos de vía” que pueden ser fuertemente impactados por las modificaciones de nivelación de la vía. Finalmente, SYSTRA ayudará a la Secretaría de Obras y Servicios a la implementación de un plan de acciones correctivas.

3. VIA FERREA

3.1 Lista de documentos solicitados y recibidos

3.1.1 Planos entregados por el Consorcio Constructor a PMDF

| Código de Plano | Título del Plano | Fecha de entrega |
|---|---|------------------|
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0001-02478-P-00 | Junta aislante pegada para vía con rieles de 115 R.E. Corte del armado y detalle de material. | 08/07/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0002-02479-P-00 | Aparato de dilatación para vía con rieles 115 R.E. Conjunto. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0003-02480-P-00 | Aparato de dilatación para vía con rieles 115 R.E. Detalles de la agujas de izq. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0004-02481-P-00 | Aparato de dilatación para vía con rieles 115 R.E. Detalles de las agujas de derecha. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0005-02482-P-00 | Aparato de dilatación para vía con rieles 115 R.E. Cojinete-placa guía-silla. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0006-02815-P-00 | Aparato de dilatación para vía con rieles de 115 R.E. Pequeño material de fijación. | 21/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0007-02816-P-00 | Vía con riel 115 R.E. Instalación de vía en curva vía emplanchuelada. | 20/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0008-02817-P-00 | Colocación de la vía con riel 115 R.E. Vía elástica con sillas y fijaciones indirectas. Conjunto. | 21/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0009-02818-P-00 | "Silla" para la fijación elástica indirecta colocación de la vía con riel 115 R.E. | 21/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0010-02819-P-00 | Colocación de la vía con riel 115 R.E. vía elástica con sillas y fijaciones indirectas. Pequeño material para fijación. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0011-02820-P-00 | Implantación de la vía con rieles 115 R.E. fijación del contra-riel 33C1 | 20/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0012-02821-P-00 | Implantación de la vía con rieles 115 R.E. Contra-riel 33C-1. Detalles de los elementos para su fijación. | 21/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0013-02822-P-00 | Junta aislante para vía con riel 115 R.E. Corte del armado y detalle del pequeño material. | 21/04/2010 |

| Código de Plano | Título del Plano | Fecha de entrega |
|---|---|------------------|
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0014-02823-P-00 | Implantación de la vía con rieles 115 R.E. sobre durmientes de concreto tipo bloque armado con juntas aislantes pegadas "J.A.P." | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02824-P-00 | Junta mecánica para vía con rieles 115 R.E. Corte del armado y detalle del pequeño material. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0016-02825-P-00 | Almohadilla de caucho acanalada tipo "longitudinal" a utilizar en durmientes de concreto para riel 115 R.E. Grapa nabra (s), grapa nabra S1 (s S1) y grapa nabra (s) (recortada). | 20/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0017-02826-P-00 | Implantación de la vía con rieles 115 R.E. sobre durmientes de concreto tipo monobloque armado con juntas aislantes pegadas "J.A.P." | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0018-02827-P-00 | Corte y perfil de rueda metálica monobloque de Ø 860. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0019-02828-P-00 | Distribución de durmientes (zona de aparatos de dilatación) riel 115 R.E. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0020-02829-P-00 | Vía con riel 115 R.E. Instalación sin silla en talleres maquinado de los durmientes. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0021-02830-P-00 | Junta mecánica planchuela tipo (AREMA) "Head Free" para vía con rieles 115 R.E. corte del armado y detalle del pequeño material. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0022-02831-P-00 | Montaje de junta mecánica (Planchuela Head Free) con rieles 115 R.E. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0023-02832-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 comunicación Tg 0.13 Entre ejes de vías 3600 desviación a la izquierda y derecha plano de conjunto. | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0024-02833-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 riel 115 R.E. - aguja AM71 de izquierda Tg 0.13 y Tg 0.20 Detalle. | 19/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02834-P-00 | Vía de 1435 - puesta al grado riel 115 R.E. Contra-aguja 115 R.E. De izquierda Tg 0.13, Tg 0.20 Detalle y derecha | 19/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0026-02909-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 riel 115 R.E. Cruzamiento Tg 0.13 a derecha plano de conjunto y cruzamiento a derecha Tg 0.20 Ensamble. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0027-02910-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 parte central de la comunicación Tg 0.13 entre ejes de vías 3600 plano de conjunto. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0028-02911-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 riel 115 R.E. Montaje contra-riel 115 R.E. desvío Tg. 0.13 Plano de conjunto | 19/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0029-02912-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 Dispositivo de maniobra para aguja Tg 0.13 montaje del cerrojo V.C.C. (Verrou Carter Coussinet) | 23/04/2010 |

| Código de Plano | Título del Plano | Fecha de entrega |
|---|--|------------------|
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0030-02913-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20, Dispositivo de maniobra para aguja Tg.0.13, Montaje de cerrojo axial. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0031-02914-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 dispositivo de maniobra para aguja Tg 0.20 montaje del cerrojo V.C.C. (Verrou Carter Coussinet) y montaje de varillas modelo 70 con TR44 o equivalente. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02915-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 desviación - zona de agujas Tg 0.13 Plano de conjunto. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0033-02916-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 riel 115 R.E. Media aguja a la izquierda-desviación a la derecha Tg. 0.13 esquema de montaje. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0034-02917-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 riel 115 R.E. - media aguja a la derecha-desviación a la derecha Tg. 0.13 esquema de montaje derecha Tg. 0.13 esquema de montaje. | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0035-02918-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 dispositivo de maniobra para aguja Tg 0.20 montaje del cerrojo axial con palanca "L" y montaje de varillas tipo 70 con palanca "SAXBY". | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0036-02919-P-00 | Enlace Tg 0.13 desvío a la izquierda y derecha plano de conjunto. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0037-02920-P-00 | Enlace Tg 0.20 desvío a la izquierda y derecha plano de conjunto. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0038-02921-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 riel 115 R.E. zona de agujas Tg 0,13 cortes B-B, C-C, D-D, E-E, F-F, G-G, H-H, I-I. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0039-02922-P-00 | Vía de 1435 - con inclinación 1/20 riel 115 R.E. cruzamiento Tg 0.13 Corte J-J Y K-K. | 19/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0040-02923-P-00 | Vía de 1435 - riel 115 R.E. desvío Tg. 0.13 y Tg. 0.20 diversos rieles | 19/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0041-02924-P-00 | Durmiente de concreto tipo bloque para rieles 115 R.E. | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0042-02925-P-00 | Durmiente de concreto tipo monobloque para riel 115 R.E. | 07/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0043-02926-P-00 | Perfil de riel 115 R.E. y contra-riel 33C-1. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0044-02927-P-00 | Vía de 1435-con inclinación 1/20 montaje del contra-riel 115 R.E. desvío Tg 0.20 ensamble | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0045-02928-P-00 | Vía de 1435 con rieles 115 R.E. 1:20 -AM71 Aguja TG. 0.20 ensamble. | 23/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0046-02523-P-00 | Vía de 1435 con inclinación 1/20 – RIELES 115 R.E. Media aguja a la izquierda en desviación a la derecha TG 0.20 esquema de montaje. | 23/04/2010 |

| Código de Plano | Título del Plano | Fecha de entrega |
|---|---|------------------|
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0047-02930-P-00 | Vía de 1435 con inclinación 1/20 - rieles 115 R.E. media aguja a la derecha en desviación a la derecha Tg 0.20 esquema de montaje. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0048-02931-P-00 | TOPE DE MADERA COLOCADO AL FINAL DE LAS VÍAS SOBRE CONCRETO Y SOBRE COLUMNAS METALICAS. | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0049-02932-P-00 | Detalles del pequeño material de fijación para riel 115 R.E. en plataforma de concreto y fosas. | 08/07/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0050-02933-P-00 | APARATOS DE VIA Tg. 0.13 UBICACION DE MOTORES TIPO T-72 (subterráneo y superficial) | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0051-02934-P-00 | Colocación de la vía en tangente y curva de $R \geq 100$ m; $75 \leq R < 100$ m; $R < 75$ m | 05/07/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0052-02935-P-00 | Distribución de durmientes de concreto para tramo en curva con $R \leq 380.000$ m | 05/07/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0053-02936-P-00 | DETALLES DE FIJACION PARA DURMIENTES DE CONCRETO CON RIELES 115 R.E. | 15/06/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0054-02937-P-00 | Perno "SL" para la fijación en durmiente y tirafondo tipo "JAB" 23x155 Y 23x115 Para fijación en durmiente de madera. | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0055-02938-P-00 | Distribución de durmientes de concreto en curvas con $R_n > 1000$ m y en tangente vía continua (L.R.S.) | 05/07/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0056-02939-P-00 | Detalle de fijación en fosas de: mantenimiento menor, de pruebas, de visita, de sopleteado, de vehículos auxiliares y plataforma de concreto. | 24/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0057-02940-P-00 | Guarnición helicoidal y perno tirafondo M22 para fijación de vía en durmientes de concreto | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0058-02941-P-00 | Durmientes de madera de transición para curva con $R < 75$ m. (Fijación rígida). | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0059-02942-P-00 | Tope de arena colocado al final de la vía sobre balasto en la zona de depósitos. | 06/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0060-02943-P-00 | Durmiente de madera tipo "SA" para vias secundarias en tangente y curva con $R \geq 75$ m (fijación rígida) | 31/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0061-02944-P-00 | Distribución de durmientes de concreto en curva con $R_n > 1000$ m y en tangente vía continua (L.R.S.) | 05/07/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0062-02945-P-00 | Vía con riel 115 R.E. distribución de durmientes de concreto para tangente y curvas de $R \geq 500.000$ m. (vía emplanchuelada) | 05/07/2010 |
| PMDF-10-VI.8-612000-III-0001-05927-P-00 | Durmiente de concreto tipo monobloque. | 01/06/2010 |

| Código de Plano | Título del Plano | Fecha de entrega |
|---|---|------------------|
| PMDF-10-VI.8-612000-III-0112-14972-P-00 | Durmiente de concreto tipo monobloque para riel 115 R.E. fijación del contra-riel 33C-1 anclada y con bridas. | 01/06/2010 |

Tabla 7. Lista de documentos Vía - Planos

3.1.2 Especificaciones técnicas entregadas por el Consorcio Constructor a PMDF

| Código de Especificación | Título | Fecha de entrega |
|---|--|------------------|
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0001-02250-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y suministro de las piezas moldeadas en acero al manganeso para los aparatos de vía. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0002-02251-E-00 | Especificación técnica para suministro de rieles de acero no tratado de calibre 115 r.e. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0003-02252-E-00 | Especificación técnica para el suministro de durmientes de madera de azobe para los aparatos de cambio de vía. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0004-02253-E-00 | Especificación funcional para la fabricación de durmientes de concreto bibloque. | 06/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0005-02254-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y recepción de planchuelas metálicas para riel 115 r.e. y aparatos de cambio de vía. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0006-02835-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y recepción de tornillos y tuercas de acero para el equipamiento de las vías. | 09/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0007-02837-E-00 | Especificación técnica para la fabricación de almohadillas acanaladas de hule a colocarse entre rieles y durmientes de concreto. | 19/05/2010 |
| PMDF-10-VI.8-612000-III-0008-14960-D-00 | Estudio para el uso de aparatos de dilatación. | 17/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0009-02839-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y recepción de los pernos "sl" utilizados en las vías. | 06/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0010-02840-E-00 | Especificación técnica para el suministro de la grapa metálica elástica "rn" para equipar las vías. | 29/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0011-02841-E-00 | Especificación técnica para el suministro de bujes aislantes tipo cañon. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0012-02842-E-00 | Especificación técnica para el suministro del cojinete aislante amortiguador para la grapa "rn". | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0013-02843-E-00 | Especificación técnica para el suministro de durmientes de madera nacional (madera dura tropical). | 20/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0014-02844-E-00 | Especificación técnica para la fabricación de los aparatos de vía y de sus refacciones. | 23/03/2010 |

| Código de Especificación | Título | Fecha de entrega |
|--|--|------------------|
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00 | Especificación técnica para el suministro de balasto. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0016-02846-E-00 | Especificación técnica para la ejecución de soldaduras aluminotérmicas en los rieles. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0017-02847-E-00 | Especificación técnica para el suministro de piezas de acero forjado, necesarias a la maniobra de los aparatos de vía. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0018-02848-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y recepción de grapillas elásticas metálicas. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0019-02849-E-00 | Especificación técnica para el suministro de juntas aislantes pegadas (jic) (jap). | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0020-02850-E-00- | Especificación técnica para la fabricación de tornillería ordinaria de acero. | 23/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0021-02851-E-00 | Especificación técnica para el suministro de contra-rieles perfil 33c-1. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0022-02852-E-00 | Especificación técnica para el suministro de los aparatos de dilatación para rieles de vía continua. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0023-02853-E-00 | Instrucción técnica para la ejecución de los trabajos de vía. | 07/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0024-02854-E-00 | Especificación técnica de la consigna de mantenimiento relativa a los aparatos de dilatación para vía armada con largos rieles soldados. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02855-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y suministro de grapas nabra para el equipamiento de las vías. | 19/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0026-02856-E-00 | Especificación técnica para el suministro de sillas de fundición para la sujeción indirecta de las fijaciones elásticas. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0027-02857-E-00 | Especificación técnica para el suministro de planchuelas aislantes ordinarias. | 14/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0028-02858-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y recepción del pequeño material aislante a utilizar en las vías. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0029-02859-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y suministro de vástagos de anclaje de acero. | 25/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0030-02860-E-00 | Especificación técnica para el suministro de grapas (sapos) y cuñas metálicas para el equipamiento de las vías. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0031-02861-E-00 | Especificación técnica para la aplicación de recubrimientos metálicos para la protección contra la corrosión. | 08/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 | Especificación funcional para la fabricación de durmientes de concreto reforzado monobloque para riel 115 re. | 23/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0033-02863-E-00 | Especificación técnica para el suministro de soportes de contra-riel 33c-1. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0034-02864-E-00 | Especificación técnica para el suministro de topes aislantes específicos de las grapas nabra. | 23/03/2010 |

| Código de Especificación | Título | Fecha de entrega |
|---|---|------------------|
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0035-02865-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y recepción de las arandelas planas. | 23/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0036-02866-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y recepción de las arandelas de presión. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0037-02867-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y recepción de las arandelas de presión de doble espira. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0040-02868-E-00 | Especificación técnica para el suministro de resina “vls” para la fijación de pernos – tirafondo en durmientes de concreto. | 07/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0041-02869-E-00 | Especificación técnica para el suministro de pernos tirafondo de acero para la fijación del riel sobre durmientes de concreto. | 07/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0042-02870-E-00 | Especificación técnica para la fabricación de la guarnición helicoidal para la fijación de riel sobre durmientes de concreto. | 07/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0043-02871-E-00 | Especificación técnica para el suministro del refuerzo de la grapa metálica elástica “rn” | 07/04/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0044-02872-E-00 | Especificación técnica para el suministro de durmientes de madera de azobe. | 31/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0045-02873-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y suministro de tirafondos “gs” y de fundas aislantes “gs”. | 31/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0046-02874-E-00 | Especificación técnica para la reposición de pernos tirafondo dañados durante la colocación de la vía, sobre durmientes de concreto. | 31/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0047-02875-E-00 | Especificación técnica para el suministro de perfiles aislantes de material plástico “end post”. | 23/02/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0048-02876-E-00 | Especificación técnica para el suministro del producto aislante (bituminoso) por colar. | 30/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0050-02877-E-00 | Especificación funcional para el suministro de los topes de seguridad en la vía de pruebas de los talleres. | 22/03/2010 |
| PMDF-10-VI.8-612000-III-0051-14968-E-00 | Especificación técnica para la fabricación y el suministro de calzas aislantes (zoclo) utilizadas para la fijación de riel en vía sobre concreto. | 08/05/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0052-02878-E-00 | Especificación técnica para la ejecución de la soldadura eléctrica por electroforja. | 22/03/2010 |
| PMDF-09-VI.8-612000-III-0055-14948-E-00 | Estudio del sistema de vías para la línea 12 del metro | 17/03/2010 |
| PMDF-10-VI 8-612000-III-0056-14957-E-00 | Especificación técnica para el suministro de bujes y arandelas aislantes. | 23/02/2010 |
| PMDF-10-VI 8-612000-III-0057-14958-E-00 | Especificación técnica para el suministro de tela aislante de fibra de vidrio texturizada. | 23/02/2010 |

Tabla 8. Lista de documentos Vía -Especificación Técnica

3.1.3 Pruebas de calidad de los elementos del sistema de vías férreas entregadas por el Consorcio Constructor a PMDF

| ELEMENTO | TIPO DE PRUEBA | NORMATIVA |
|---|--|--|
| RIEL 115 RE(lb/yd) | Tensión | PMDF-09-VI.8-612000-III-0002-02251-E-00 / ASTM E8-08 |
| | Dureza brinell | PMDF-09-VI.8-612000-III-0002-02251-E-00 / ASTM E10-08 |
| | Análisis químico | PMDF-09-VI.8-612000-III-0002-02251-E-00 / UIC-860-R |
| | Examen macroscópico | PMDF-09-VI.8-612000-III-0002-02251-E-00 / UIC-860-R |
| DURMIENTES DE CONCRETO PRESFORZADO MONOBLOQUE PARA RIEL 115 RE (lb/yd) | Examen visual de aspectos exterior | PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 |
| | Control de las cotas y tolerancias | PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 |
| | Control de calidad del concreto y agregados | PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 / NMX-C-114-ONNCE-2004/ NMX-C-III-ONNCE-2004 |
| | Momento flexionante positivo sobre el asiento del riel | PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 |
| | Momento flexionante negativo sobre el asiento del riel | PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 |
| | Momento flexionante positivo sobre el centro del durmiente | PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 |
| | Momento flexionante negativo sobre el centro del durmiente | PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 |
| | Tracción para funda aislante | PMDF-09-VI.8-612000-III-0032-02862-E-00 |
| BALASTO | Desgaste deval | PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00 / AFNOR P-18577 |
| | Fraccionamiento Los Angeles | PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00 / ASTM-C535 / AFNOR P-18573 |
| | Granulometría | PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00 / ISO/TC 24 |
| | Agujas | PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00 |
| | Lacios | PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00 |
| | Homegeneidad | PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00 |
| | Limpieza | PMDF-09-VI.8-612000-III-0015-02845-E-00 |
| FIJACION | Tamaño de grano | PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02855-E-00 / |
| | Resiliencia longitudinal | PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02855-E-00 / NF-A-03-156 / NF-A-03-151 |
| | Resiliencia transversal | PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02855-E-00 / NF-A-03-156 / NF-A-03-151 |
| | Macrográfico | PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02855-E-00 / NF-A-04-201 / NF-A-05-152 |
| | Niebla salina | PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02855-E-00 / NF-X41-002 |
| | Fatiga bajo esfuerzo variable | PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02855-E-00 / |

| ELEMENTO | TIPO DE PRUEBA | NORMATIVA |
|------------------------|-------------------------|---|
| | Geometría | PMDF-09-VI.8-612000-III-0025-02855-E-00 / |
| APARATOS DE VÍA | Certificados de calidad | |

Tabla 9. Lista de documentos Vía - Pruebas de calidad

3.2 Inspección visual de la línea

Se ha realizado una inspección visual del tramo de línea donde el servicio comercial ha sido suspendido (viaducto).

La inspección visual se realizó los días 06 y 07/05/2014 sobre el tramo elevado de la línea:

- entre el depósito-taller de TLAHUAC y la estación de LOS OLIVOS,
- entre la estación de TEZONCO y el PK 12+600,
- entre las estaciones de LOMAS ESTRELLA y de CULHUACAN,

Las zonas objeto de la inspección son representativas del conjunto de la línea e incluyen la mayor parte de las curvas de radio pequeño inferiores a 500 m donde son constatados los desórdenes más importantes presentes en la línea.

La inspección visual ha sido realizada por un recorrido a pie sobre el conjunto de las dos vías por los expertos de SYSTRA. Esta inspección visual ha permitido presentar el estado en que se encuentran actualmente las zonas objeto del mismo para el diagnóstico.

El seguimiento de las filas de riel fue hecho para cada vía en su sentido de circulación.

Los centros de las curvas (derecha e izquierda) se localizaron con relación al eje de la línea en sentido creciente de PK.

| PK | Trazado | Constataciones |
|---------------------|--|---|
| Talleres de TLAHUAC | <u>Curva 1:</u> R=110 m Del centro a la izquierda | Trazas de fricción sobre la brida de la JAE Desgaste ondulatorio en la fila baja Chaflán en la fila alta Problema de rodadura sobre las soldaduras Rebabas exteriores sobre la fila baja |
| | <u>Curva 2:</u> R =112 m Del centro a la izquierda | Desgaste ondulatorio en la fila baja E = 1,428 – D = 3 del lado de la fila baja Junta angulosa |
| Estación de TLAHUAC | ∞ | Problema de rodadura sobre la junta Problema de rodadura sobre las soldaduras Desgaste lateral del riel de fila alta con desgarro del metal Aumento de arcilla en el andén Comunicación V1-V2 con desgaste ondulatorio Agujas melladas |

| PK | Trazado | Constataciones |
|--------------------|---|---|
| | | Valor de las cuñas bajo el contra-riel (35 mm la de 80 mm – 67 mm por la de 45 mm) Durmientes de diferente tipo dentro del JAE Desgaste ondulatorio Head-checking |
| 4,650 – V2 | | Desgaste vertical del riel bajo = 6 mm + Desgaste lateral del riel alto= 2 mm E = 1,433 – D = 110 |
| 4,723 | <u>Curva 3:</u> R = 200 m Del centro a la izquierda | V1: E = 1,437 – D = 162 V2: E = 1,435 – D = 157 (riel graso) |
| 4,745 | | Perno roto en el contra-riel sobre V1 Fijaciones rotas Fijaciones con doble lámina de resorte metálica Desgaste vertical en el riel bajo= 5 mm Desgaste lateral en el riel alto= 2 mm |
| 4,765 | | Cabeza del durmiente de la fila baja empotrado en el balasto Cabeza del durmiente de fila alta: Sin observaciones Perfiles de balasto límites Balasto bajo durmiente sucio y húmero Topes de durmientes redondeados |
| 4,780 | | Durmiente roto |
| 4,975 | | ∞ |
| 5,050 | <u>Curva 4:</u> R = 550 m Del centro a la derecha | Desgaste ondulatorio ligero V1: E = 1437 – D = 98 V2: E = 1437 – D = 91 |
| 5,055 | | Balasto triturado |
| 5,095 | | Problema de rodadura sobre soldadura |
| 5,320 | ∞ | Rodadura diferente en fila izquierda y fila derecha |
| | <u>Curva 5:</u> R = 400 m Del centro a la derecha | Desgaste ondulatorio de filas altas y bajas V1: longitud de onda 16 cm (trenes frenando) V2: longitud de onda 12 cm fila baja y 10 cm fila alta (trenes acelerando) Desgaste vertical 3 mm |
| Estación TLALTENCO | ∞ | |
| 6,015 | <u>Curva 6:</u> R = 1000 m Del centro a la derecha | Balasto contaminado por arena |

| PK | Trazado | Constataciones |
|---------------------|---|---|
| 6,150 | ∞ | AR |
| | | Desgaste ondulatorio en fila baja y alta Desajuste de la fila baja y balasto redondeado |
| 6,285 | <u>Curva 7:</u> R = 200 m Del centro a la izquierda | Durmiente con grieta en el eje |
| 6,290 | | V1: E = 1437 – D = 164 V1: Desgaste lateral del riel alto = 1 mm – Desgaste vertical del riel bajo = 2 mm V2: D = 165 |
| 6,420 | | Soldaduras angulosas V1 |
| 6,515 | | Problema de rodadura sobre soldadura |
| 6,565 | <u>Curva 8:</u> R = 2100 m Del centro a la derecha | Zona de reemplazo de durmientes en V1 y V2 (durmientes PRET) |
| 6,920 | <u>Curva 9:</u> R = 20000 m Del centro a la izquierda | AR Durmiente con problemas desmoldado lateral |
| Estación ZAPOTITLAN | ∞ | |
| 7,400 | <u>Curva 10:</u> R = 450 m Del centro a la derecha | Nivelado desigual V2 por reemplazo de durmientes Desgaste ondulatorio Balasto con muchos elementos de caliza (Riel graso) |
| 7,775 | <u>Curva 11:</u> R = 200 m Del centro a la derecha | Durmiente roto |
| 7,780 | | Desgaste ondulatorio + desajuste V1: E = 1439 – D = 145 V2: E = 1440 – D = 167 |
| 7,785 | | % alto de balasto de caliza Desajuste en V1 |
| 8,029 | Punto de inflexión entre C11 et C12 | |
| | <u>Curva 12:</u> R = 200 m Del centro a la izquierda | Soldaduras angulosas en fila baja V2 Durmientes agrietados en el empalme de espesor (zona de bateo mecánico desfasada con el contra-riel) Desgaste ondulatorio a pesar de la amoladura (< 3 meses según el acompañante de la STC): longitud de onda diferente entre la fila alta y baja |
| 8,250 | | Nabla rota Durmientes rotos en el eje |
| | | Desajuste en la fila baja de la vía 1 |

| PK | Trazado | Constataciones |
|-------------------|---|--|
| 8,327 | ∞ | Rodadura diferente en la fila izquierda (todo el hongo) y en fila derecha (rodadura sobre largo medio) sobre V1 y V2 |
| Estación NAPOLERA | | Rodadura diferente sobre la fila izquierda y la fila derecha |
| 8,904 | <u>Curva 13:</u> R = 755 m Del centro a la derecha | V1: E = 1438 – D = 64 V2: E = 1440 – D = 51 Balasto de caliza redondeado |
| 9,050 | | JAE: huellas sobre la brida de la fila derecha, sin huellas sobre fila izquierda |
| 9,200 | ∞ | Rodadura diferente sobre las 4 filas |
| 9,495 | <u>Curva 14:</u> R = 1100 m Del centro a la izquierda | V1: E = 1435 – D = 37 V2: E = 1437 – D = 34 |
| 9,710 | | V1 fila derecha: soldadura defectuosa: cuña de 14/100 con regla de 40 cm |
| Estación OLIVOS | ∞ | |

Zona no visitada entre OLIVOS y TEZONCO

| PK | Trazado | Constataciones |
|------------------|---|--|
| Estación TEZONCO | ∞ | |
| 10,800 | <p><u>Curva 15:</u> R = 250 m Del centro a la derecha</p> | V2: inicio del contra-riel |
| 10,850 | | V2: inicio del desgaste ondulatorio sobre las dos filas (longitud de onda = 14 cm) V2- file H: desgaste vertical 1 mm – desgaste lateral = 0 |
| 10,885 | | V1: fisuras transversales en la fila baja (trenes en aceleración) |
| 10,902 | | V1: E = 1439 – D = 134 V2: E = 1437 – D = 126 V2: longitud de onda 6 à 7 cm sobre fila alta– 8 à 9 cm sobre fila baja (trenes frenando) |
| 10,910 | | V1 fila baja: altitud de onda= 30 à 40/100 mm |
| 10,965 | | V2: fin del desgaste ondulatorio (fin del contra-riel a 11,000) |
| | ∞ | |
| 11,245 | <p><u>Curva 16:</u> R = 225 m Del centro a la derecha</p> | Desgaste ondulatorio (longitud de onda = 7 cm) Trazas de “chariotage” (movimiento transversal de la rueda por deslizamiento) (sinusoide de 7-8 cm) Deformación por fluencia del metal con fisuras en las filas bajas V1 y V2 |
| 11,280 | | Soldaduras angulosas sobre la fila baja Desajuste en la fila baja |
| 11,300 | | V1: E = 1441 – D = 145 V2: E = 1440 – D = 144 (Riel graso) |
| 11,400 | | V1: Fin del desgaste ondulatorio (fin del contra-riel a 11,420) |
| 11,420 | ∞ | V1: Rodadura diferente sobre las dos filas. |
| | <p><u>Curva 17:</u> R = 200 m Del centro a la izquierda</p> | Nivelación afectada a la entrada de la curva V2: Inicio del contra-riel: 11,620 – Inicio de desgaste ondulatorio: 11,650 |
| 11,704 | | Durmientes rotos en la vía 2 |
| 11,706 | | Fijación del contra-riel suelta |
| 11,735 | | V2: Juntal de ajuste a cada lado de la traviesa |
| 11,755 | | V1: E = 1439 – D = 165 V2: E = 1435 – D = 155 |

| PK | Trazado | Constataciones |
|-----------------------------|---|---|
| 11,780 | | Nabla rota Altura del desgaste ondulatorio: 60 à 70/100 mm V1 fila baja Desajuste V1 fila baja y balasto redondeado |
| 11,855 | | Fin del desgaste ondulatorio (fin del CT a 11,871) |
| | <u>Curvas 18 et 19:</u> R = 3000 m Del centro a la izquierda y a la derecha | |
| 12,000 | ∞ | En los durmientes centrales del JAE V2 |
| 12,210 | <u>Curva 20:</u> R = 3000 m Del centro a la izquierda | Defecto de nivelación a la salida de la curva 20 V1: E = 1437 – D = 2 V1: desgaste ondulatorio en las filas alta y baja V2: Inicio del head-checking y trazas de deformación por fluencia del metal |
| 12,280 | <u>Curva 21:</u> R = 3000 m Del centro a la derecha | V1: desgaste ondulatorio ligero en la fila alta y más marcado en la fila baja V1: E = 1440 – D = 0 V2: desgaste ondulatorio ligero a mitad de la curva |
| Estación PERIFERICO ORIENTE | ∞ | |
| 12,500 | | V2: Inicio del contra-riel CR activo desde el 3 ^{er} soporte hasta el intervalo entre el 5 ^{to} y el 6 ^{to} soporte |
| 12,520 | <u>Curva 22:</u> R = 200 m Del centro a la izquierda | V2: Inicio del head-checking en la fila alta con trazas de deformación por fluencia del metal |
| 12,525 | | V2: Inicio del desgaste ondulatorio, onda de 9-10 cm en las 2 filas Deformación por fluencia del metal en la fila baja |

Zona no visitada entre el 12,680 y LOMAS ESTRELLA

| PK | Trazado | Constataciones |
|------------------------------|---|--|
| 14,815 | | V2: Inicio del desgaste ondulatorio (inicio del CR: 14,792) Juntal de ajuste fila baja (14,921) |
| 14,950 | <u>Curva 27:</u> R = 200 m Del centro a la derecha | V2: E = 1438 – D = 135 Desgaste lateral del riel alto= 2 mm Desgaste vertical del riel bajo: 3 mm V1: Altura de onda en fila alta = 50/100 mm – fila baja = 40/100 mm |
| 15,075 | | V2: Fin del desgaste ondulatorio (fin del CR a 15,100) |
| 15,170 | | V2: inicio del head-checking en la fila alta (inicio del CR = 11,150) |
| 15,175 | | V2: Inicio del desgaste ondulatorio |
| 15,220 | | V2: fin del head checking |
| 15,285 | <u>Curva 28:</u> R = 200 m Del centro a la izquierda | V1: E = 1438 – D = 159 V2: E = 1437 – D = 165 Existencia de rebabas exteriores en la fila alta y deformación por fluencia del metal con fisuras en la fila baja |
| 15,320 | | Aplastamiento en riel bajo (rebabas de 2 mm) Riel alto: rebabas exteriores |
| 15,375 | | Fin del desgaste ondulatorio (fin del CR en PK 15,412) |
| | <u>Curva 29:</u> R = 3000 m Del centro a la izquierda | RAS |
| 15,710 | | Rodadura de las 4 filas del riel V2 fila D al riel V1 fila D. |
| Estación SAN ANDRES TOMATLAN | ∞ | |
| 16,050 | | V1: Inicio del head-checking (inicio de CR en el PK 16,020) |
| 16,065 | | V1: inicio del desgaste ondulatorio |
| 16,100 | <u>Curva 30:</u> R = 300 m Del centro a la derecha | V1: JAE con trazas sobre la brida Zona de reemplazo de numerosas traviesas (todo en PRET) |
| 16, 205 | | V1: E = 1439 – D = 156 V2: E = 1435 – D = 160 |
| 16,300 | | Nivelación y levantamiento sobre V2 |

| PK | Trazado | Constataciones |
|-----------------------|--|--|
| 16,335 | | V1: Fin del desgaste ondulatorio (fin el CR a 16,380) |
| 16,490 | Curva 31: R = 1100 m Del centro a la izquierda | Head-checking en la fila alta JAE: desajuste de 2 durmientes centrales con trazas de fricción sobre las 2 filas |
| 16,795 | Curva 32: R = 350 m Del centro a la derecha | Sin escamado V1: Inicio del desgaste ondulatorio (inicio del CR a 16,740) Vía 1 amolada |
| 16,820 | | V2: Soldadura con inclusión |
| 16,848 | | V1: durmiente roto |
| 16,863 | | V1: E = 1438 – D = 87 V2: E = 1439 – D = 88 |
| 16,885 + 16,900 | | Durmiente roto+ Fijación del CR desajustada y desmontada |
| 16,945 | | V1: Fin del desgaste ondulatorio (fin del CR a 16,985) |
| Estación CULHUACAN | | ∞ |

3.2.1 Constataciones generales luego de la inspección visual

La inspección visual pone en evidencia degradaciones y anomalías importantes de diferentes componentes de la vía. Los defectos importantes sobre:

- los rieles: desgaste ondulatorio, desgaste lateral, desgaste vertical, aplastamiento, deformación por fluencia del metal, fisuras, head-checking, desnivelaciones de la superficie de rodadura,
- las soldaduras aluminotérmicas: defectos de geometría, hoyos en la superficie,
- los durmientes: rotura, fisuras y grietas, desgaste anormal del concreto,
- las fijación del riel: apriete excesivo, aflojamiento, rotura,
- las fijaciones del contra-riel: aflojamiento, rotura,
- el balasto: contaminación por elementos finos, crecimiento de lodo, friabilidad y desgaste prematuro
- la geometría de la vía: defectos de nivelación, defectos de alineación de la vía

Los defectos están principalmente ubicados en las curvas de radio inferior o igual a 800m; el número y la gravedad de los defectos constatados están ligados al valor del radio de la curva (cuanto más pequeño es el radio, más grande es el número y la gravedad de las fallas).

Los defectos afectan sobre todo a los rieles (sobre las dos filas). Los defectos de riel especialmente los que se refieren a la superficie de la circulación generan las vibraciones que ocasionan otras degradaciones: rupturas de ataduras del riel, deterioración de la nivelación, desgaste del balasto...

El detalle de las anomalías por componente se presenta en el párrafo 3.2.2.

3.2.2 Examen de los componentes de la vía férrea

3.2.2.1 Rieles

El riel es de tipo 115 RE de matiz 900; proviene de dos proveedores:

- Arcelor Mittal España (Ensidesa),
- Tata Francia (Corus Hy).

Las vías están constituidas por barras largas soldadas formadas a partir de carriles elementales de 18 m soldados en vía por aluminotermia.

Los defectos graves se acumulan sobre las curvas de radio inferior o igual a 800m y su frecuencia depende del radio de curvatura.

Se observan configuraciones similares en la mayoría de las curvas:

- la entrada a la curva (y la salida) primero es marcada por la aparición de fisuras transversales (defecto llamado head-checking) sobre la cabeza del riel de la fila alta:



Foto 1. Head-checking vía 2 PK 12,213, cerca de Estación Periférico Oriente

- con aumento de la curvatura, un desgaste ondulatorio aparece sobre ambas filas de rieles. La profundidad y la amplitud de las ondas varían según el radio de la curva y la velocidad de los trenes: la longitud de ondas varía de 6-7 cm a 15-16 cm y la profundidad alcanza 0,5-0,6 mm



Foto 2. Desgaste ondulatorio de amplitud 6-7 cm vía 2 PK 10,905

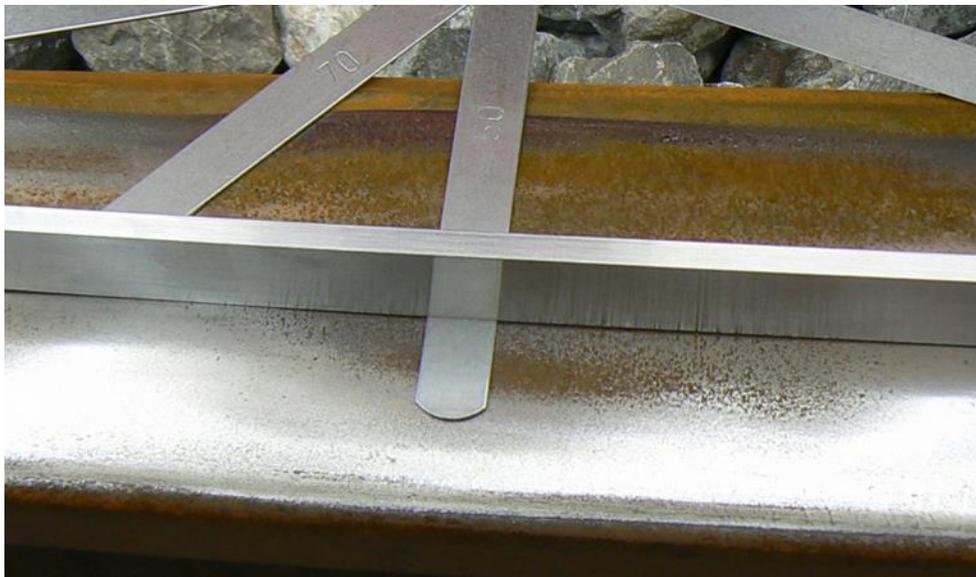


Foto 3. Profundidad de 0,5 mm vía 1 PK 11,780

- según la curva, el desgaste ondulatorio es acompañado de rastros de “chariotage” (movimiento transversal de la rueda por deslizamiento):



Foto 4. Rastros de movimiento transversal de la rueda por deslizamiento en vía 2 en PK 12,520

Este fenómeno se comprueba en ambas filas de carriles de la curva. En la fila alta, en los casos más avanzados, se observa una fluencia de metal con creación de una rebaba en la parte exterior del riel.



Foto 5. Rebabas en el exterior del carril de la fila alta sobre vía 2 al PK 15,320

- La cabeza del riel de la fila baja presenta, además del desgaste ondulatorio, fisuras transversales; estas fisuras parecen superficiales, un control por ultrasonidos permitió medir su componente vertical:

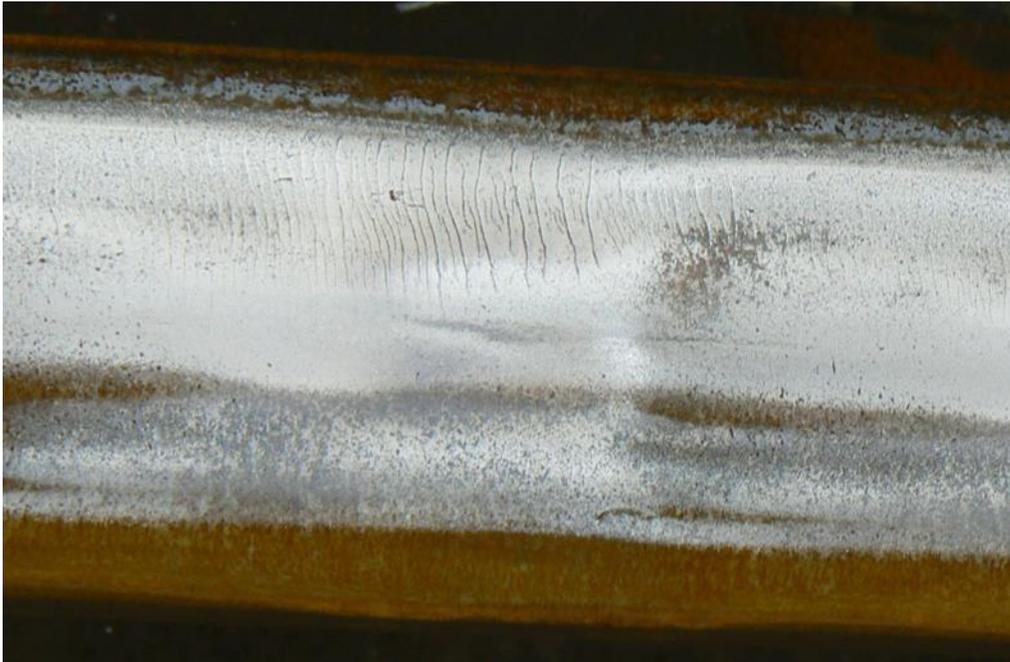


Foto 6. Fisuras transversales sobre el hongo sobre vía en el PK 10,885

En todas las curvas donde el riel presentó estas fisuras, un control fue realizado por el Instituto Politécnico Nacional. La profundidad mayor medida por ultrasonido fue de 0,72mm lo que es muy inferior a la norma de reemplazo del riel que es de 10mm.

- un desgaste vertical en la cabeza del riel de 1 a 3 mm sobre la fila alta y de 2 a 6 mm (6 mm en la curva 3) sobre la fila baja ;
- un desgaste lateral en la cabeza del riel de la fila alta de 1 a 2 mm ;

En los tramos rectos de la vía este defecto se presenta en menor medida.

En alineamiento recto, los defectos que afectan a los rieles son menores. También se observaron:

- Superficies de rodadura no homogéneas entre ambas filas del riel.



Foto 7. Rodadura fila izquierda y derecha PK 9,400 vía 1

- Un gran número de soldaduras aluminotérmicas presentan defectos de realización:
 - Defectos de geometría dados por una instalación deficiente de los rieles antes de soldar
 - o un esmerilado defectuoso después de solar.
- Cabe notar que la inclinación del riel es correcta con su valor nominal de 1/20.

- Soldadura hueca:



Foto 8. Soldadura vía 1 - PK 9,710

- Defecto de alineación:



Foto 9. Soldadura PK 6,515 vía 1

- Despegue del metal:



Foto 10. Soldadura PK 16,820 vía 2

- Soldaduras angulosas en curvas de radio pequeño:



Foto 11. Soldadura angulosa en la fila baja de la vía 2 curva 12

Sin identificación y corrección de la fuente de estos desgastes anormales, todo tratamiento será meramente temporal y los defectos reaparecerán muy rápidamente.

3.2.2.2 *Contra-riel en las curvas*

Las curvas con radios inferiores a 380m están equipadas de un contra-riel colocado en el lado interior de la fila baja.

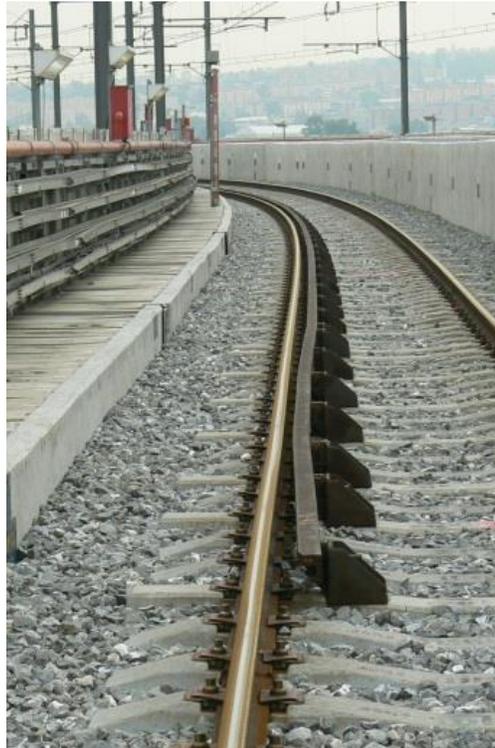


Foto 12. **Contra-riel de la curva 27 vía 2**

Los contra-rieles son activos en la zona de entrada y de salida entre el 3er y 6° soporte; en el resto de la curva, la colocación a una distancia (laguna) de 80 mm permite que no exista contacto con la rueda.

Se realizarán investigaciones complementarias respecto a la implantación de los contra-rieles.

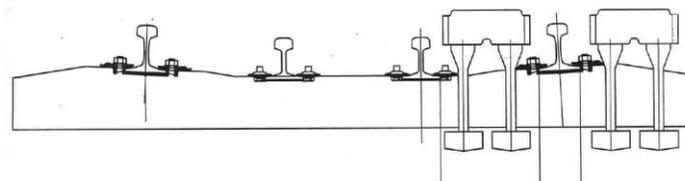


Foto 13. Trazas de fricción (zona activa del contra-riel) comprendido entre el 3° y el 6° soporte (curva 27)

Por otro lado está implantación molesta las operaciones de bateo mecánico pesado.

El papel y propósito de estos contra-rieles, si es activo o pasivo por concepción, fue precisado a SYSTRA:

- limitar las consecuencias de un descarrilamiento: en ese caso, se colocaría un riel de seguridad en el eje de la vía, lo que favorecería el bateo mecánico ;



- favorecer la inscripción de los vehículos en las curvas: la laguna entonces se adapta para darles una función activa sobre la curva. En este caso, un estudio de interfaz riel/rueda y de impacto sobre la inscripción de los vehículos en curva debe realizarse. De hecho, el contra-riel juega este papel a la salida de las curvas.

Los defectos siguientes están relacionados:

- varios dispositivos de fijación del contra-riel están flojos,



Foto 14. Brida de fijación del contra-riel aflojada en PK 16,900

- en la zona activa del contra-riel, la longitud de apoyo del contra-riel sobre su soporte es reducida a algunos milímetros debido a las cuñas necesarias para respetar la laguna de 45mm, dejando poca superficie de soporte.



Foto 15. Apoyo del contra-riel sobre 3 mm en extremo del soporte (curva 3)

3.2.2.3 Durmientes

Los durmientes monobloc en concreto pretensado; son de 3 tipos:

- Durmiente de vía en línea ITISA,
- Durmiente de vía en línea PRET,
- Durmientes con soporte de contra-rieles PRET.

El número de durmientes es de:

- 1515 durmientes/kilometro en alineación,
- 1666 durmientes/kilometro en curva.

El análisis puso en evidencia:

- los defectos de moldeado,



Foto 16. Durmientes con moldeado lateral anormal en PK 7,020

El problema de moldeado lateral muestra un proceso de fabricación no completamente controlado y se puede temer que existan anomalías de fabricación más importantes o ubicadas en zonas críticas para la resistencia del durmiente.

- la ruptura de durmientes



Foto 17. Durmiente roto en PK 11,704 vía 2

- las grietas longitudinales



Foto 18. Durmiente agrietada longitudinalmente en PK 16,848

- las grietas transversales de los durmientes,



Foto 19. Durmiente agrietada transversalmente en PK 6,985



Foto 20. Traviesa agrietada en el centro en el PK 16,848 vía 1

- un desgaste anormal del concreto sobre las cabezas de los durmientes de la fila baja en las curvas de radio reducido.



Foto 21. Balasto incrustado en el hormigón de la traviesa en PK 4,765 vía 1 (antes de desguarnecido)



Foto 22. Cabeza del durmiente en PK 4,765 vía 1 (Después de desguarnecido)

La presencia de numerosos durmientes rotos y agrietados, a pesar de la sustitución masiva ya realizada, es un nuevo factor que inquieta a causa de la juventud de la línea.



Los durmientes rotos ya no son capaces de asegurar su función principal consistente en mantener la separación y la estabilidad del riel. **Este estado presenta un riesgo para la seguridad de las circulaciones.**

Los durmientes agrietados no son reparables; las grietas sólo se agravarán para conducir a la rotura del durmiente. Este fenómeno de ruina puede ser rápido a causa de las vibraciones generadas por el estado del riel y puede producirse al paso de un tren.

En las curvas de radio pequeño (< 500m), la vía está instalada con un peralte importante (alcanzando 160 mm). Los esfuerzos del balasto en la cabeza del durmiente de la fila baja son elevados. Se comprueba en varias zonas un desgaste del hormigón de la cabeza del durmiente por los granos de balasto (ver ilustraciones del PK 4,765 vía 1 más arriba). Esta situación hace temer el mismo fenómeno para el fondo de los durmientes lo que sería perjudicial para su resistencia a mediano plazo y sobre todo para el mantenimiento de la nivelación en el muy corto plazo. **No fue posible hacer un sondeo para verificar el estado de la superficie inferior de los durmientes de hormigón durante el análisis; esta comprobación se tiene que hacer en una investigación suplementaria**

Además hay que subrayar que la cuantiosa y constante sustitución de los durmientes rotos ocasiona un deterioro de la nivelación perjudicial para la calidad general de la vía.

3.2.2.4 Sistema de fijación

El sistema de fijación del riel es de tipo Nabla Evolution (aislamiento plástico + lámina de resorte metálica) utilizadas con placa de asiento de caucho de 9 mm bajo el riel.

De manera general las fijaciones Nabla están muy apretadas. Esta presión excesiva lleva a un desgaste acelerado del aislamiento de plástico y una pérdida en término de la elasticidad de la lámina de resorte metálica.

Pero otras anomalías son constatadas:

- ciertas fijaciones están rotas o agrietadas



Foto 23. Fijación Nabla agrietada en PK 8,250



Foto 24. Fijación Nabla rotas en PK 11,780

Estas grietas y rupturas de las fijaciones son la consecuencia de una parte, de una presión excesiva y por otra parte, de las vibraciones generadas en el riel por los defectos de superficie de la circulación (desgaste ondulatorio en particular.)

- las fijaciones están ausentes



Foto 25. Fijación faltante en el PK 4,975 (con funda obstruida)

No es posible determinar si la falta de unión se debe a la obstrucción de la funda que impidió la colocación del tirafondo o si la contaminación de la funda es la consecuencia de la ausencia del tirafondo y del tapón obturador (los durmientes son normalmente entregadas por el fabricante con un tapón obturador sobre las fundas).

- las fijación han sido colocadas con una doble lamina de resorte metálica



Foto 26. Fijación colocada con dos láminas de resorte en el PK 4,985

Esta situación puede resultar un error en la colocación o una acción voluntaria para compensar una incapacidad de apretar la unión (fondo de la funda obstruido).

3.2.2.5 Balasto

El balasto se encuentra formado por elementos de roca basáltica y de elementos de roca caliza. Estos materiales tienen resistencia a la abrasión diferente. Se comprueba un desgaste acelerado de los elementos calcáreos.



Foto 27. Balasto de tipo diferente en PK 9,030

Este desgaste conduce a redondear los pedazos de balasto lo que es perjudicial para el posicionamiento y configuración (imbricación) de los pedazos entre ellos y consecuentemente para la estabilidad de la nivelación y de la geometría de la vía.



Foto 28. Diferencia de desgaste entre un elemento de origen basáltico y un elemento de origen calcáreo en PK 10,800



Foto 29. Balasto redondeado por el movimiento (oscilación vertical) de los durmiente en PK 10,800 vía 1

Por otro lado el desgaste del balasto produce un polvo que tapona los intersticios entre elementos, lo que, con el tiempo, perjudica la circulación del agua y contamina la capa de balasto, afectando a la estabilidad de la nivelación de la vía.



Foto 30. Balasto bajo durmiente contaminado por finos y que retienen la humedad en PK 4,765 vía 1

A causa de los defectos de riel y de las vibraciones generadas, los granos calcáreos se redondean rápidamente y contaminan el espesor de balasto lo que es nefasto para la nivelación de la vía.

Por otro lado diversos defectos de instalación son observados:

- Contaminación por arcilla:



Foto 31. Contaminación por arcilla en estación de Tlahuac

- Contaminación por elementos finos:



Foto 32. Elementos finos en el balasto PK 6,015 vía 2

- Mala granulometría:



Foto 33. Granulometría demasiado pequeña PK 5,055

El desgaste prematuro comprobado sobre los elementos de balasto de origen calcáreo parece anormal y hace temer dificultades importantes en el drenaje de la vía y en el mantenimiento de sus características geométricas.

3.2.2.6 Juntas aislantes pegadas

La separación entre los durmientes de las juntas aislantes pegadas se adaptada a la inserción de las conexiones inductivas en vía pero esta inserción impide un refuerzo en la separación entre los durmientes a la altura de la junta. Esta configuración no favorece la estabilidad de la nivelación de la vía.



Foto 34. Juntas aislante pegadas con durmientes centrales inestables PK 16,490 vía 1

Se comprueban rastros de fricción en la parte superior de las bridas en varias juntas. El origen parece ser el rozamiento de la pestaña de las ruedas.



Foto 35. Junta aislante con rastro sobre la brida en la estación de Tlahuac

3.2.2.7 Aparatos de vía

Melladuras importantes son observadas sobre ciertos aparatos de vía particularmente en la estación y en el taller de Tlahuac.



Foto 36. Aguja mellada en estación de Tlahuac

Un arrastre de metal o una melladura en una aguja modifica el punto de contacto de la pestaña sobre la aguja y puede entrañar descarrilamiento por subida de la rueda sobre el riel.

3.2.2.8 Aparatos de dilatación

Se está chequeando si hubo un proceso de liberación de las tensiones luego de las instalaciones del conjunto de rieles.

3.2.2.9 Nivelación

Los defectos de superficie del riel generan defectos de nivelación.



Foto 37. Defectos de nivelación en curva 7

La presencia del contra-riel en las curvas (fila baja) molesta los trabajos por bateado mecánico pesado.

La sustitución masiva de durmientes perturba la nivelación y necesitará varios trabajos y acciones correctivas para volver a una calidad de geometría correcta a causa de los asientos bajo los nuevos durmientes

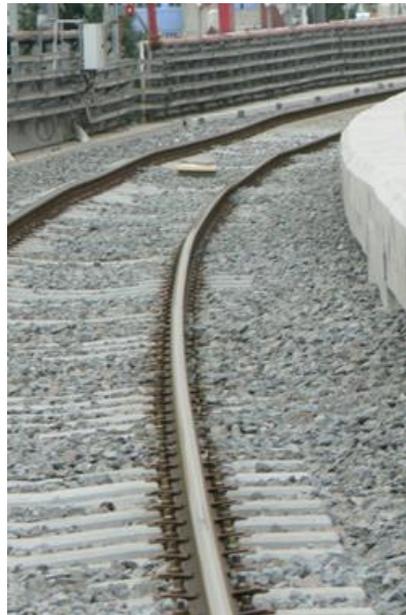


Foto 38. Defectos de nivelación en curva 10 vía 2 en respuesta a sustitución de durmientes

La sustitución de más de 4000 durmientes crea tantas zonas sensibles cuya nivelación tiene que ser vigilada y corregida.

3.2.3 Síntesis

El estado de las infraestructuras es alarmante a causa del número de desórdenes comprobados y de su velocidad de aparición y de evolución considerando que la línea inició su explotación hace menos de dos años.

Tal como se indica anteriormente, la mayoría de los defectos (y los más graves) conciernen a los rieles y afectan a las curvas inferiores a 500m de radio. Los problemas de interacción riel/rueda e interfaz infraestructura/material rodante parecen ser la causa de la mayoría de los defectos que afectan a los rieles pero estas situaciones no deben enmascarar otras causas de las averías y problemática de la línea 12.

Así, según las constataciones hechas en la visita de la vía, el origen de las degradaciones puede ser clasificado en dos categorías:

- **Problemas de diseño y de realización:**
 - mala interacción riel / rueda e interfaz infraestructura / material que rueda: desgaste de los rieles en curva,

- fabricación: agrietamiento y rotura de durmientes, composición del balasto,
- puesta en ejecución: soldaduras, presión excesiva de las fijaciones, defectos de geometría,...
- **Consecuencias de los defectos de riel y de rueda:**
 - agravación de los defectos de rieles,
 - agravación de los defectos de durmientes,
 - rotura de fijaciones
 - desgaste del balasto,
 - deterioro de la nivelación

Los análisis y las investigaciones complementarias que se realizarán en el marco de este análisis, deben permitir comprender mejor los fenómenos observados sobre la línea 12.

3.2.4 Investigaciones complementarias

Más allá del análisis documental de concepción de la línea y de la realización de los trabajos, investigaciones complementarias fueron llevadas a cabo (véanse párrafo 3.4):

- El análisis detallado del historial de aparición y de seguimiento (control) de los defectos así como la comparación con el historial de los trabajos y las acciones correctivas iniciadas ; estos análisis cruzados deben permitir precisar la cronología de aparición de los desgastes y estimar su ciclo de evolución;
- La presencia de contra-rieles y su finalidad; el papel de estos contra-rieles:
 - Limitar las consecuencias de un descarrilamiento: en este caso, se colocaría un riel de seguridad en el eje de la vía, lo que favorecería el bateado mecánico;

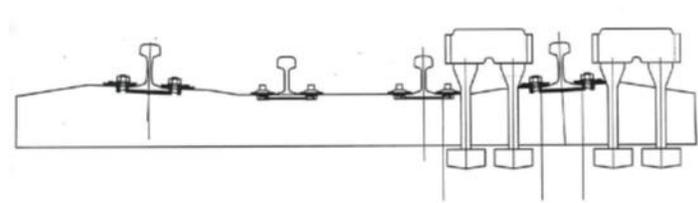


Figura 2. Esquema de bateado mecánico

- Favorecer la inscripción de los vehículos en las curvas: en este último caso, se tiene que realizar un estudio de la interfaz riel / rueda y del impacto de la inscripción de los vehículos en curva;

- La adaptación de la fijación Nabla Evolution al patín del riel tipo 115 RE; a causa del perfil del patín de este riel, sólo la arista del aislante plástico asegura el contacto con el patín contrariamente al riel UIC.

En complemento del análisis que consistió en un examen simple y visual de los rieles y alguna toma de medidas manual, se requieren controles complementarios en vía:

- Ciertas zonas son sujetas a la aparición de fisuras del metal; esta fisuración parece sólo ser superficial pero se preconiza un control por ultrasonidos de estas zonas;
- Las soldaduras aluminotérmicas y las juntas de los rieles presentan anomalías en la zona de rodadura entre los dos rieles; una comprobación de la inclinación de los rieles es necesaria así como un control por regla electrónica de las soldaduras;
- Los valores de amplitud y de longitud de onda del desgaste ondulatorio deben ser objeto de un registro;
- Los sondeos del balasto bajo durmientes son necesarios para verificar los espesores puestos en obra, la granulometría y la limpieza del balasto; estos sondeos también permitirán verificar el estado de la superficie inferior de los durmientes.

Finalmente, deben realizarse controles de conformidad (geometría, dureza, resistencia, composición,...) sobre los siguientes elementos del sistema de vías:

- Durmientes
- Balasto,
- Rieles.

3.3 Análisis del trazado de vía

3.3.1 Trazado en planta

3.3.1.1 Radio mínimo y Longitud mínima de los elementos de curvas

En la visita del tramo en viaducto de la línea, Systra ha constatado **diferentes problemas** en las curvas de un radio inferior a 380m.

El objeto de estudio de Systra concierne únicamente el tramo en viaducto pero en el caso del trazado de la vía se hará una evaluación general del conjunto de la línea.

Los problemas de un trazado con curvas de radio pequeño ya fueron previstos en la Memoria de Cálculo - Proyecto de implantación de vía, trazo y perfil. PMDF-11-VI. 13-612000-III-0001-10296-M00:

§1.1.2. Radio de curvaturas (R)

Los inconvenientes de un trazo con curvas de radio pequeño ($R < 250m$) no se limitan a la reducción de velocidad sino que traen consigo las siguientes consecuencias:

En la curva, la diferencia de rieles interior y exterior comienza a ser significativa, causando que las ruedas mancomunadas no compensen la diferencia de velocidad requerida provocando que las ruedas exteriores se deslicen sobre el riel exterior, generando así fuertes vibraciones y desgastes mayores en los rieles.

Los dos ejes del mismo bogie no se orientan de manera radial generando esfuerzos de inscripción del bogie en la curva que se transforman en resistencia al desplazamiento y desgaste ondulatorio de los rieles.

*Para el diseño de curvas horizontales de **vías principales** del Sistema de Transporte Colectivo Metro, habrá de considerarse un **radio mínimo normal de 250m** y un **radio mínimo excepcional será de 200m**.*

En lo relativo a la longitud mínima, en la Memoria de Cálculo se encuentra la siguiente información:

§1.1.7. Longitud mínima de los elementos del alineamiento horizontal

La duración de marcha, a través de un elemento del trazo horizontal ya sea una recta o una curva (inclusive sus longitudes de transición) no deberá ser menor a 1.5 seg. Así pues, la longitud mínima de las rectas o curvas será de 16.000m.

Esta longitud mínima de 16 m resulta de considerar una velocidad en línea de 38.4 km/h. Se constata que **esta velocidad no es coherente con la velocidad del proyecto**. Hemos considerado como la velocidad de referencia en curva de 70 km/h indicada en la página 22 de la Memoria de Cálculo, obtenemos una longitud mínima de 30 m.

Notamos también una imprecisión respecto a la longitud mínima de la curva, ya que este valor no ha de incluir la longitud de las curvas de transición.



En el caso particular de las curvas 11 y 12, se trata de una curva en S con un tramo de alineación recta de 16m entre las dos clotoides de cada curva. Esta longitud del tramo recto es inferior a la recomendada por SYSTRA y hubiera sido preferible realizar un punto de inflexión entre ambas clotoides sin tramo recto entre ellas. De manera general, se estudiará en la etapa siguiente del estudio si se puede rectificar el trazo tomando en cuenta las limitaciones impuestas por el galibo dinámico y la catenaria.

Tabla 10. Resumen de las curvas de radio inferior a 380 m donde existen elementos de trazo que no cumplen la longitud mínima exigida:

| MEMORIA DE CALCULO | | | | | | | ELABORACION PROPIA | | | | | | |
|--------------------|------------|-------|------|-------|-----|-----|--|-----------------|--------------------|--|------|------------------------------|---------|
| Num | PI | RC | Lcl | V | hp | i | PI Origen Clotoide u Origen Alineacion | PI Fin Clotoide | PI Origen clotoide | PI Fin Clotoide o Fin Alineacion Recta | Lcl | L-Alineacion Recta o L-Curva | L < 30m |
| | | m | m | Km/h | mm | mm | | | | | m | m | 30 |
| 1 | | 110 | | | | | 3 968 | 3 968 | 4 139 | 4 139 | | 171 | |
| AR | | | | | | | 4 139 | | | 4 165 | | 26 | X |
| 2 | | 112.1 | | | | | 4 165 | 4 165 | 4 217 | 4 217 | | 52 | |
| 3 | 4+723.845 | 200 | 62.3 | 70 | 160 | 129 | 4 589 | 4 651 | 4 780 | 4 842 | 62.2 | 129 | |
| 7 | 6+337.987 | 200 | 62.3 | 70 | 160 | 129 | 6 167 | 6 230 | 6 410 | 6 473 | 62.2 | 181 | |
| AR | | | | | | | 6 473 | | | 6 497 | | 25 | X |
| 9 | 6+749.705 | 20000 | 0 | 90 | 0 | 5 | 6 741 | 6 741 | 6 758 | 6 758 | 0 | 17 | X |
| 11 | 7+878.522 | 200 | 62.3 | 70 | 160 | 129 | 7 718 | 7 781 | 7 947 | 8 009 | 62.2 | 166 | |
| AR | | | | | | | 8009 | | | 8030 | | 20 | X |
| 12 | 8+193.749 | 200 | 62.3 | 70 | 160 | 129 | 8 030 | 8 092 | 8 264 | 8 326 | 62.2 | 172 | |
| 15 | 10+902.274 | 250 | 72 | 80 | 162 | 140 | 10 809 | 10 881 | 10 921 | 10 993 | 72.0 | 40 | |
| 16 | 11+303.089 | 225 | 67 | 75 | 161 | 134 | 11 182 | 11 249 | 11 349 | 11 416 | 67.1 | 100 | |
| 17 | 11+754.798 | 200 | 62.3 | 70 | 160 | 129 | 11 637 | 11 699 | 11 800 | 11 862 | 62.2 | 100 | |
| AR | | | | | | | 11 862 | | | 11 889 | | 27 | X |
| 18 | 11+899.734 | 3000 | 0 | 80 | 0 | 25 | 11 889 | 11 889 | 11 910 | 11 910 | 0.0 | 21 | X |
| AR | | | | | | | 11 910 | | | 11 927 | | 17 | X |
| 19 | 11+937.901 | 3000 | 0 | 90 | 0 | 32 | 11 927 | 11 927 | 11 949 | 11 949 | 0.0 | 21 | X |
| 20 | 12+218.328 | 3000 | 0 | 70 | 0 | 19 | 12 210 | 12 210 | 12 227 | 12 227 | 0.0 | 17 | X |
| AR | | | | | | | 12 227 | | | 12 243 | | 17 | X |
| 21 | 12+252.096 | 3000 | 0 | 70 | 0 | 19 | 12 243 | 12 243 | 12 261 | 12 261 | 0.0 | 18 | X |
| 22 | 12+592.487 | 200 | 62.3 | 70 | 160 | 129 | 12 506 | 12 568 | 12 614 | 12 676 | 62.2 | 46 | |
| 24 | 14+222.548 | 4000 | 0 | 90 | 0 | 24 | 14 210 | 14 210 | 14 235 | 14 235 | 0.0 | 25 | X |
| AR | | | | | | | 14 235 | | | 14 254 | | 19 | X |
| 25 | 14+265.999 | 4000 | 0 | 90 | 0 | 24 | 14 254 | 14 254 | 14 278 | 14 278 | 0.0 | 24 | X |
| 27 | 14+960.240 | 200 | 62.3 | 70 | 160 | 129 | 14 800 | 14 862 | 15 029 | 15 091 | 62.2 | 166 | |
| 28 | 15+286.692 | 200 | 62.3 | 70 | 160 | 129 | 15 164 | 15 226 | 15 336 | 15 398 | 62.2 | 109 | |
| 30 | 16+207.288 | 300 | 75.6 | 85 | 160 | 124 | 16 033 | 16 109 | 16 288 | 16 364 | 75.6 | 180 | |
| 32 | 16+863.443 | 350 | 80 | 90 | 160 | 113 | 16 756 | 16 836 | 16 889 | 16 969 | 80.0 | 54 | |
| 34 | 17+359.143 | 300 | 62.3 | 70 | 160 | 33 | 17 286 | 17 348 | 17 369 | 17 432 | 62.2 | 21 | X |
| 37 | 19+185.601 | 200 | 53.4 | 60 | 160 | 52 | 18 956 | 19 010 | 19 272 | 19 326 | 53.3 | 263 | |
| 40 | 19+865.962 | 800 | 16.5 | 74.25 | 40 | 41 | 19 839 | 19 855 | 19 877 | 19 893 | 16.5 | 22 | X |
| 43 | 20+661.391 | 250 | 62.3 | 70 | 160 | 71 | 20 583 | 20 646 | 20 676 | 20 738 | 62.2 | 30 | |
| AR | | | | | | | 20 738 | | | 20 758 | | 20 | X |
| 44 | 20+813.812 | 250 | 40 | 55 | 131 | 12 | 20 758 | 20 798 | 20 828 | 20 868 | 40.0 | 30 | |
| 45 | 21+225.193 | 2100 | 0 | 90 | 0 | 46 | 21 207 | 21 207 | 21 243 | 21 243 | 0.0 | 36 | |
| AR | | | | | | | 21 243 | | | 21 259 | | 16 | X |
| 46 | 21+278.391 | 2100 | 0 | 80 | 0 | 36 | 21 259 | 21 259 | 21 297 | 21 297 | 0.0 | 38 | |
| 52 | 23+699.835 | 3000 | 0 | 90 | 0 | 32 | 23 689 | 23 689 | 23 711 | 23 711 | 0.0 | 22 | X |
| 53 | 24+259.658 | 280 | 62.3 | 70 | 160 | 46 | 24 044 | 24 106 | 24 370 | 24 432 | 62.2 | 264 | |

| MEMORIA DE CALCULO | | | | | | | ELABORACION PROPIA | | | | | | |
|--------------------|------------|------|------|-------|-----|----|--|-----------------|--------------------|--|------|------------------------------|---------|
| Num | PI | RC | Lcl | V | dp | i | PI Origen Clotoide u Origen Alineacion Recta | PI Fin Clotoide | PI Origen clotoide | PI Fin Clotoide o Fin Alineacion Recta | Lcl | L-Alineacion Recta o L-Curva | L < 30m |
| | | m | m | Km/h | mm | mm | | | | | m | | m |
| 54 | 25+190.579 | 255 | 62.3 | 70 | 160 | 71 | 24 988 | 25 050 | 25 290 | 25 353 | 62.2 | 241 | |
| 55 | 25+671.848 | 280 | 62.3 | 70 | 160 | 46 | 25 567 | 25 629 | 25 711 | 25 773 | 62.2 | 82 | |
| 56 | 25+912.954 | 280 | 54 | 69.42 | 140 | 63 | 25 804 | 25 858 | 25 963 | 26 017 | 54.0 | 105 | |
| 57 | 26+354.771 | 8000 | 0 | 90 | 0 | 12 | 26 340 | 26 340 | 26 369 | 26 369 | 0.0 | 29 | X |
| 59 | 27+218.966 | 800 | 20 | 72 | 50 | 26 | 27 176 | 27 196 | 27 242 | 27 262 | 20.0 | 45 | |
| AR | | | | | | | 27 262 | | | 27 279 | | 17 | X |
| 60 | 27+330.241 | 750 | 22 | 72 | 55 | 27 | 27 279 | 27 301 | 27 359 | 27 381 | 22.0 | 58 | |
| 61 | 27+660.369 | 4000 | 0 | 90 | 0 | 24 | 27 649 | 27 649 | 27 672 | 27 672 | 0.0 | 24 | X |
| 64 | 28+581.084 | 250 | 46.7 | 60 | 140 | 30 | 28 520 | 28 566 | 28 595 | 28 642 | 46.7 | 29 | X |
| 65 | 29+053.710 | 225 | 53 | 60 | 159 | 30 | 28 985 | 29 038 | 29 068 | 29 121 | 53.0 | 29 | X |
| 66 | 29+224.351 | 260 | 44.7 | 60 | 135 | 26 | 29 171 | 29 216 | 29 232 | 29 277 | 45.0 | 16 | X |

3.3.1.2 Peralte máximo, insuficiencia de peralte, velocidad máxima

Los valores indicados en la Memoria de Calculo son los siguientes:

- Velocidad de operación máxima en vía libre: 90 km/h
- Velocidad de operación máxima en Patios y Talleres: 20 km/h
- Escantillón o trocha de vía: 1435 mm
- Peralte teórico: $ht = 11.8 V^2/R$
- Peralte práctico: aproximadamente corresponde a 2/3 del valor teórico ≤ 160 mm
- Insuficiencia de peralte: $I = ht - hp \leq 150$ mm
- Velocidad de variación del peralte: $di/dt = 75$ mm/seg

Analizando parcialmente el eje en planta del trazado de las vías, observamos ciertas incoherencias en los valores del peralte práctico respecto al método de cálculo preconizado:

| MEMORIA DE CALCULO | | | | | | | | ELABORACION PROPIA | | | | |
|--------------------|------------|-----|------|-------|-----|-----|-----|--------------------|------------|-----|-----------|-----|
| Num | PI | RC | Lcl | V | ht | hp | l | ht | hp (2/3ht) | l | hp ≤160mm | l |
| | | m | m | Km/h | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm |
| 3 | 4+723.845 | 200 | 62.3 | 70 | 289 | 160 | 129 | 289 | 193 | 96 | 160 | 129 |
| 7 | 6+337.987 | 200 | 62.3 | 70 | 289 | 160 | 129 | 289 | 193 | 96 | 160 | 129 |
| 11 | 7+878.522 | 200 | 62.3 | 70 | 289 | 160 | 129 | 289 | 193 | 96 | 160 | 129 |
| 12 | 8+193.749 | 200 | 62.3 | 70 | 289 | 160 | 129 | 289 | 193 | 96 | 160 | 129 |
| 15 | 10+902.274 | 250 | 72 | 80 | 302 | 162 | 140 | 302 | 201 | 101 | 160 | 142 |
| 16 | 11+303.089 | 225 | 67 | 75 | 295 | 161 | 134 | 295 | 197 | 98 | 160 | 135 |
| 17 | 11+754.798 | 200 | 62.3 | 70 | 289 | 160 | 129 | 289 | 193 | 96 | 160 | 129 |
| 22 | 12+592.487 | 200 | 62.3 | 70 | 289 | 160 | 129 | 289 | 193 | 96 | 160 | 129 |
| 27 | 14+960.240 | 200 | 62.3 | 70 | 289 | 160 | 129 | 289 | 193 | 96 | 160 | 129 |
| 28 | 15+286.692 | 200 | 62.3 | 70 | 289 | 160 | 129 | 289 | 193 | 96 | 160 | 129 |
| 30 | 16+207.288 | 300 | 75.6 | 85 | 284 | 160 | 124 | 284 | 189 | 95 | 160 | 124 |
| 32 | 16+863.443 | 350 | 80 | 90 | 273 | 160 | 113 | 273 | 182 | 91 | 160 | 113 |
| 34 | 17+359.143 | 300 | 62.3 | 70 | 193 | 160 | 33 | 193 | 128 | 64 | 128 | 64 |
| 37 | 19+185.601 | 200 | 53.4 | 60 | 212 | 160 | 52 | 212 | 142 | 71 | 142 | 71 |
| 43 | 20+661.391 | 250 | 62.3 | 70 | 231 | 160 | 71 | 231 | 154 | 77 | 154 | 77 |
| 44 | 20+813.812 | 250 | 40 | 55 | 143 | 131 | 12 | 143 | 95 | 48 | 95 | 48 |
| 53 | 24+259.658 | 280 | 62.3 | 70 | 206 | 160 | 46 | 207 | 138 | 69 | 138 | 69 |
| 54 | 25+190.579 | 255 | 62.3 | 70 | 231 | 160 | 71 | 227 | 151 | 76 | 151 | 76 |
| 55 | 25+671.848 | 280 | 62.3 | 70 | 206 | 160 | 46 | 207 | 138 | 69 | 138 | 69 |
| 56 | 25+912.954 | 280 | 54 | 69.42 | 203 | 140 | 63 | 203 | 135 | 68 | 135 | 68 |

Tabla 11. Incoherencias en los valores del peralte práctico respecto al método de cálculo preconizado

3.3.2 Perfil longitudinal

Sin observaciones.

3.3.3 Vías secundarias y Vías de Patio y talleres

Las vías secundarias corresponden a tramos sin presencia de pasajeros, en los que los trenes circulan a baja velocidad y la vía está instalada sin peralte.

Debido al fuerte desgaste en las curvas 1 (R=110m) y curva 2 (R=112m) de las vías secundarias, se recomienda:

- Realizar un sobre ancho de la vía a 1445 mm, conforme a la norma UIC-710.
- La instalación de engrasadores fijos en la vía,



3.3.4 Correcciones recomendadas

Siendo el trazado de las vías casi inmodificable por la realización de la obra en viaducto y en túnel, la actuación posible a nivel de trazado es la reducción del peralte de las vías y en consecuencia la reducción de velocidad.

Systra recomienda la reducción del peralte máximo a 100 mm y un valor máximo de la insuficiencia de 100mm) Esta decisión está justificada teniendo en cuenta el sobre espesor de balasto en el riel elevado consecuente de un peralte a 160 mm según se ha descrito en el parágrafo 3.4.4.

En las tablas se indica el peralte practico (hp) y las velocidades máxima (Vd) y mínima (Vi) recomendadas.

Systra propondrá el peralte más adecuado en las curvas de radio inferior a 350 m.

La lista de curvas que concierne la reducción de peralte se presenta por escenario en las tablas de las páginas siguientes:

| MEMORIA DE CALCULO | | | | | | | V real en curva | | MODIFICACION Hp max 100mm, lmax=100mm | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|-----|-----|------|-----|-----|-----------------|--------------|--|-----|------|------|------|---------|--|
| CURVA | PI | RC | Lcl | V | hp | i | Vmin km/h | Vmax km/h | hp | l | Vhp | Vi | p | Ai / At | |
| | | m | m | Km/h | mm | mm | | | mm | mm | km/h | km/h | mm/m | mm/s | |
| Tlahuac 4+330,070 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3-1 | 4+724.838 | 202 | 64 | 55 | 150 | 27 | 19 | 56 | 60 | 70 | 45 | 30 | 0.9 | 14 | |
| 3-2 | 4+722.852 | 198 | 77 | 70 | 160 | 132 | 17 | 36 | 60 | 80 | 50 | 30 | 0.8 | 14 | |
| Tlaltenco | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7-1 | 6+339.273 | 202 | 63 | 60 | 160 | 50 | 61 | 61 | 100 | 100 | 60 | 40 | 1.6 | 27 | |
| 7-2 | 6+336.701 | 198 | 74 | 60 | 160 | 55 | 58 | 59 | 100 | 100 | 60 | 40 | 1.3 | 22 | |
| Zapotitlan 7+043,891 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11-1 | 7+877.347 | 198 | 71 | 60 | 160 | 55 | 60 | 60 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.1 | 22 | |
| 11-2 | 7+879.834 | 202 | 63 | 60 | 160 | 50 | 60 | 60 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.3 | 24 | |
| 12-1 | 8+195.008 | 202 | 63 | 60 | 160 | 50 | 60 | 60 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.3 | 24 | |
| 12-2 | 8+192.599 | 198 | 71 | 60 | 160 | 55 | 60 | 60 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.1 | 22 | |
| Nopalera 8+469,840 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Los Olivos 9+980,010 | | | | | | | | | | | | | | | |
| San Lorenzo Tezonco 10+620,502 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-1 | 10+902.082 | 248 | 85 | 60 | 140 | 31 | 63 | 64 | 85 | 100 | 60 | 40 | 1.0 | 20 | |
| 15-2 | 10+902.928 | 252 | 72 | 60 | 140 | 29 | 62 | 66 | 70 | 100 | 60 | 40 | 1.0 | 23 | |
| 16-1 | 11+302.261 | 223 | 79 | 65 | 160 | 64 | 63 | 63 | 80 | 100 | 60 | 40 | 1.0 | 21 | |
| 16-2 | 11+303.699 | 227 | 67 | 65 | 160 | 60 | 63 | 63 | 80 | 100 | 60 | 40 | 1.2 | 25 | |
| 17-1 | 11+755.967 | 202 | 63 | 65 | 160 | 87 | 59 | 60 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.3 | 24 | |
| 17-2 | 11+754.372 | 198 | 74 | 65 | 160 | 92 | 58 | 59 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.1 | 21 | |
| Periferico Oriente 12+391,958 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22-1 | 12+586.308 | 202 | 63 | 55 | 150 | 27 | 60 | 61 | 70 | 100 | 55 | 35 | 1.1 | 24 | |
| 22-2 | 12+597.421 | 206 | 62 | 55 | 145 | 29 | 58 | 60 | 70 | 100 | 55 | 35 | 1.1 | 25 | |
| Calle 11 13+576,007 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lomas Estrella 14+631,565 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27-1 | 14+959.120 | 198 | 77 | 60 | 160 | 55 | 59 | 60 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.0 | 20 | |
| 27-2 | 14+961.497 | 202 | 59 | 55 | 150 | 27 | 56 | 59 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.4 | 26 | |
| 28-1 | 15+287.536 | 202 | 63 | 60 | 160 | 50 | 60 | 60 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.3 | 24 | |
| 28-2 | 15+285.848 | 198 | 74 | 60 | 160 | 55 | 59 | 59 | 80 | 100 | 55 | 35 | 1.1 | 21 | |
| San Andres Tomatlan 15+841,413 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30-1 | 16+206.450 | 298 | 88 | 70 | 160 | 31 | 65 | 77 | 90 | 100 | 70 | 50 | 1.0 | 22 | |
| 30-2 | 16+208.126 | 302 | 76 | 70 | 160 | 32 | 64 | 75 | 80 | 100 | 70 | 45 | 1.1 | 26 | |
| 32-1 | 16+863.086 | 348 | 94 | 60 | 90 | 32 | 60 | 66 | 90 | 30 | 60 | 50 | 1.0 | 5 | |
| 32-2 | 16+863.800 | 352 | 80 | 60 | 90 | 31 | 62 | 68 | 90 | 30 | 60 | 50 | 1.1 | 6 | |
| Pueblo Culhuacan 16+981,401 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34-1 | 17+358.885 | 350 | 58 | 60 | 90 | 31 | 57 | 57 | 70 | 50 | 60 | 45 | 1.2 | 14 | |
| 34-2 | 17+359.401 | 302 | 62 | 60 | 110 | 31 | 60 | 60 | 70 | 60 | 60 | 40 | 1.1 | 16 | |
| Atlalilco 18+802,346 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37-1 | 19+187.419 | 202 | 54 | 50 | 110 | 36 | 47 | 47 | 60 | 100 | 50 | 30 | 1.1 | 26 | |
| 37-2 | 19+183.783 | 198 | 72 | 45 | 90 | 31 | 47 | 47 | 60 | 70 | 45 | 30 | 0.8 | 12 | |

Tabla 12. Lista de curvas que concierne la reducción de peralte

3.3.4.1 Conclusión

El radio mínimo en la Línea 12 no debería haber sido inferior a 300 m. Los radios inferiores empleados han conllevado un alto riesgo de que se produzca desgaste ondulatorio y a la necesidad de poner en obra peraltes muy fuertes para poder respetar la velocidad de Proyecto.

No se han respetado las reglas habituales de trazado en los tramos en recta entre curvas (0 m o 30 m mínimo entre 2 curvas consecutivas). El hecho de no obtener ya sea un punto de inflexión (0 m) o una distancia de 30 m es fuente inestabilidad del vehículo.

3.4 Examen de los componentes de la vía férrea

3.4.1 Rieles

3.4.1.1 Conformidad en relación con el Especificaciones técnicas

El riel es de tipo 115 RE de matiz 900; proviene de dos proveedores:

- Arcelor Mittal España (Ensidesa),
- Tata Francia (Corus Hy).

La geometría del riel Re115 instalado está de conformidad con la geometría proporcionada por Arema 2003 Volume 1 Track – Chapter 4- Rail.

Las pruebas realizadas están de conformidad con la norma EN 13 674-1 Rieles Vignole de masa superior o igual a 46kg/m.

| Componente | RIEL | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Resultados de laboratorio | Dureza : OK (R260) | Examen micrografico : OK |

3.4.1.2 Verificación del sistema calidad a través de la producción

Los proveedores Mittal y Tata han provisto todos los documentos. Las pruebas están de conformidad con las recomendaciones de la norma.

3.4.1.3 Análisis de la realización de Largos Rieles Soldados (LRS)

La realización de LRS se realizó en la vía y no en taller. Numerosas soldaduras aluminotérmicas presentan defectos de realización y de geometría. Estos defectos provocan choques al paso de los trenes. Parece que los LRS no han sido liberados, lo que genera tensiones que afectan a la obtención de una geometría de calidad.

Habitualmente, antes de la puesta en servicio, es recomendable realizar un amolado preventivo de los rieles para eliminar los defectos de construcción. Esta operación no se realizó.

3.4.1.4 Comentarios

Dos comentarios sobre el perfil del riel RE115 :

- El radio de la cabeza es de 8 mm (en vez de 13 en un perfil UIC), lo que es muy agresivo
- El reducido ancho del patín (140 mm) unido a su importante altura favorece que el volcado del riel sometido a fuertes cargas laterales

El porcentaje de soldaduras presentando defectos geométricos o metalúrgicos es anormalmente elevado, lo que provoca una mala calidad de la geometría de la vía.

3.4.1.5 Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis

El riel no presenta defectos de fabricación, sin embargo, su puesta en obra es criticable (calidad de las soldaduras, ausencia de liberación de tensiones).

3.4.2 Durmientes

3.4.2.1 Conformidad en relación con las especificaciones técnicas

La verificación geométrica de los durmientes no amerita ningún comentario. Las dimensiones y las tolerancias son respetadas; sin embargo, al acumularse las tolerancias de los durmientes con las del sistema de fijación del riel, se encuentran en el rango inferior de valores que da un ancho de riel de entre 1435mm (trocha nominal) y 1434mm (trocha ligeramente inferior). La trocha mínima de la vía es de 1433.5mm.

La verificación de las notas de cálculo se están llevando a cabo por el departamento de obras de ingeniería civil de Systra; los resultados estarán integrados en el capítulo 5.

3.4.2.2 Verificación del sistema calidad durante la producción

PRET e ITISA son empresas certificadas y poseen un sistema de calidad.

Sin embargo, desde la puesta en servicio de la circulación de los trenes, se mostró que muchos de los durmientes de PRET presentaban defectos, como la reacción alcalina, derivados de la calidad del hormigón. Se puede deducir que el sistema de calidad de esta empresa presentó defectos debido a que este fenómeno se manifiesta habitualmente en un periodo más largo.

En cuanto a los durmientes de ITISA que se rompieron, se trata de un problema de instalación y no de fabricación.

Actualmente, la SNCF está realizando pruebas de resistencia para validar la conformidad de los diferentes tipos de durmientes.

| Componente | Durmientes ITISA et PRET nuevos | |
|---------------------------|---|---------------------|
| Resultados de laboratorio | Ensayos según la norma de capacidad: OK | Aspecto : OK |

| Componente | Durmientes ITISA et PRET tomados de la vía | |
|---------------------------|---|---|
| Resultados de laboratorio | Ensayos según la norma de capacidad: OK | Aspecto: Muy degradado debido a una mala calidad del concreto o por esfuerzos anormales. |

3.4.2.3 Análisis de la instalación de la vía

Como se ha descrito en el párrafo anterior, una pequeña cantidad (50) de durmientes se encuentran rotos. La grieta se encuentra en el centro del durmiente. Estas grietas son clásicas de una instalación errónea al momento de la realización de la vía.

En las zonas de curvas de radio reducido, se colocaron durmientes que permiten fijar el contra-riel. En cierto número de curvas situadas esencialmente en el viaducto (curvas 3, 5, 7, 11, 12, 17 y 22), se realizó una mezcla entre durmientes de contra-riel y durmientes normales. Esta disposición debe prohibirse debido a que los durmientes tienen una altura distinta que perjudica la calidad y la nivelación del balasto.

Además, el remplazo de 10.664 durmientes tuvo por consecuencia la alteración de la geometría inicial de la vía.

3.4.2.4 Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis

Se recomienda:

- Terminar rápidamente el remplazo de los últimos durmientes agrietados,
- Proceder a la homogeneización de las curvas 3, 5, 7, 11, 12, 17, y 22 con un mismo tipo de durmientes (como dentro del túnel) para optimizar el bateado de la vía.

OJO : esta acción no deberá llevarse a cabo en caso de cambio de la estructura de la vía.

3.4.3 Fijaciones

3.4.3.1 Conformidad en relación con Especificaciones técnicas

La fijación Nabla Evolution es la elegida para la línea 12 en su conjunto.

El diseño de la placa plástica de asiento sobre el riel no es óptimo para el uso de dicha fijación en rieles RE115. Los próximos suministros previstos por el fabricante Railtech corregirán esta ligera anomalía.

Sin embargo, esta anomalía no es perjudicial ya que no ha habido ninguna ruptura del sistema de fijación en curvas de radio superior a 350m (ninguna ruptura en el alineamiento recto).

Las rupturas constatadas son por consecuencia del fuerte desgaste ondulatorio de los rieles.

3.4.3.2 Verificación del sistema calidad a través de la producción

Railtech ha entregado su sistema de aseguramiento de la calidad y su producción está en conformidad con sus procesos de aseguramiento.

Railtech ha realizado varias series de pruebas (conforme a la norma Arema y la norma EN) que resultaron concluyentes.

| Componente | Fijaciones | |
|---------------------------|--|---|
| Resultados de laboratorio | Insatlación: topes no optimizados para el riel RE 115 | ensayos de capacidad según norma: OK |

3.4.3.3 *Análisis de la instalación de la vía*

Durante la visita a la línea, se desmontaron algunas fijaciones para su examinación. Se constató que el interior de las fundas estaba contaminado. Esta contaminación puede tener como consecuencia fisuras de durmientes debido al rechazo de los tornillos por la presión. El origen de esta contaminación no se ha determinado. **¿Fue por la fabricación de los durmientes, su almacenaje, transporte o preparación?**

3.4.3.4 *Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis*

En cuanto Railtech pueda suministrar un tope adaptado al perfil RE115, será necesario proceder a la sustitución de los topes en el conjunto de la Línea.

3.4.4 **Balasto**

3.4.4.1 *Calidad de la roca*

Se encontraron dos tipos de material diferentes en el balasto de la línea: elementos de origen basáltico y elementos calcáreos. El origen de esta mezcla está por determinarse: ¿la mezcla fue provista al tiempo de la construcción o por consecuencia de descargas posteriores?

En la especificación técnica “mexicana” para la provisión del balasto, se precisa que el balasto es el resultado de la trituración de rocas extraídas de canteras de piedras duras (granito, diorita, pórfido, cuarcita, basalto, etc.). Por la lectura de la especificación “mexicana” parece que la piedra calcárea puede utilizarse y la acción de mezclar los dos tipos de rocas no se prohíbe aparentemente.

- Dureza: la dureza del balasto se define teniendo en cuenta la resistencia al desgaste (ensayo Deval seco y húmedo) y la resistencia a la fractura (ensayo Los Angeles).
 - Los anexos 1 y 2 de las especificaciones proveen el método de cálculo para determinar el coeficiente de dureza instantánea (DRI) y dureza global (DRG) con los valores de ensayo de Deval y Los Angeles.



- DRI mini: 15
- DRG mini: 17

Todos los resultados de los ensayos se consideran de conformidad por el laboratorio mexicano designado.

Comentario:

Los estándares internacionales como Arema y otras normas europeas:

- Arema 1997 Volume 1 Track – Chapter 1 Roadway & ballast-2 – Ballast- chapter 2-10-4-e,
- EN 13450 Áridos para balasto (véanse Anexo **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Recomendamos el uso exclusivo de rocas duras y eliminar las rocas sedimentarias como la calcárea para una colocación de vías con durmientes de hormigón.

A fortiori, la mezcla de los dos tipos de rocas (eruptivas y sedimentarias) está prohibida según la norma europea. El hecho de mezclar rocas duras y rocas blandas lleva a un desgaste prematuro de las rocas blandas. Los finos creados por este desgaste tapan el balasto que pierde, así, parte de su eficacia mecánica y reduce su capacidad de drenaje. Al término, el sistema de drenaje no será funcional.

3.4.4.2 Espesor puesto en obra

Los espesores puestos en obra están de conformidad con el diseño provisto por PMDF.

Comentario:

El espesor mínimo de balasto bajo la fila baja es de 35cm hasta 40cm. En vía en curva hay que añadir 160mm de espesor correspondientes al peralte y a veces, se observó en el terreno, una altura de 170mm que conduce a un espesor de 57cm bajo la fila alta.

Este espesor es excesivo y contribuye a una inestabilidad de la vía.

SYSTRA recomienda un valor máximo de peralte de 100mm para limitar este espesor.

3.4.4.3 Granulometría

La granulometría está de conformidad con las especificaciones aplicables en México.

En la práctica, y teniendo en cuenta las condiciones de trituración y de cribado, se autoriza cierta dispersión de las dimensiones al interior de una granulometría.

- Clase granular del balasto:
 - Dimensión maximal: $D = 50$
 - Dimensión minimal: $d = 25$

La norma precisa que los elementos deben ser poliédricos con bordes angulares. Este no es el caso de la calcárea.

| Porcentaje de masa que pasa a través del tamiz | | | |
|--|-----------------|-----------------------|---|
| <i>Tamiz</i> | <i>EN 13450</i> | <i>Norma mexicana</i> | <i>Observaciones</i> |
| 80 mm | 100% | 100% | |
| 63 mm | 100% | 100% | Rechazar si $\geq 3\%$ no pasa |
| 50 mm | 70 à 99% | 97% | Rechazar si 20% no pasa |
| 40 mm | 30 à 65% | 26 à 60% | Rechazar si $\leq 21/\geq 65\%$ no pasa |
| 31.5 mm | 1 à 25% | | |
| 25 mm | | 5% | Rechazar si $\leq 90\%$ no pasa |
| *22.4 mm | 0 à 3% | | |
| 16 mm | | 99% | Rechazar si $\leq 98\%$ no pasa |
| 31.5 à 50 mm | $\geq 50\%$ | | |
| *Se permite utilizar un tamiz de 25 mm en lugar de un tamiz de 22.4 mm con una tolerancia de 0 a 5%. | | | |

Tabla 13. Comparación de las normas europea y mexicana

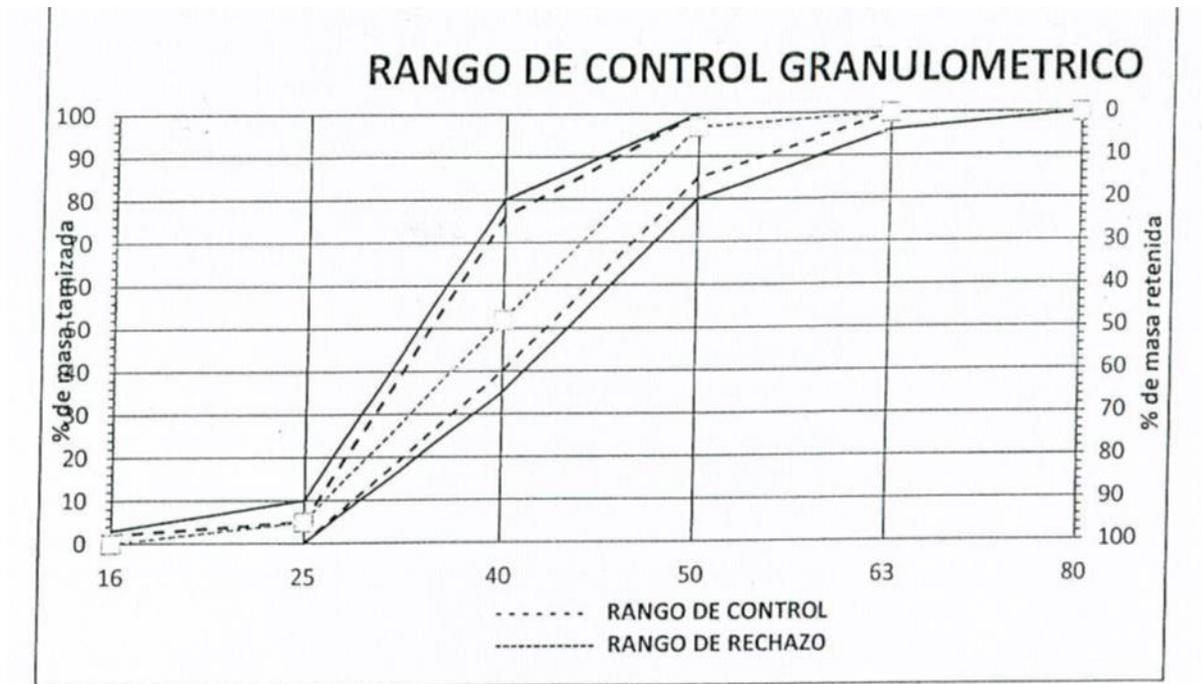


Figura 3. Curva granulométrica mexicana

Por la lectura de esta curva granulométrica, parece que el porcentaje de finos autorizados es elevado.

3.4.4.4 Dureza (ensayos LA y Micro-deval)

La dureza está al parejo con los resultados provistos. Sin embargo, se están realizando una serie de pruebas complementarias. Los resultados de las mismas pueden ser distintos a los resultados previos debido a que se ha efectuado una mezcla de basalto/calcrea en las acciones de mantenimiento.

3.4.4.5 Comentarios en relación con las especificaciones técnicas

La dureza y la granulometría están de conformidad con las especificaciones técnicas a la lectura de los resultados.

3.4.4.6 Verificación del sistema calidad de la cantera y controles a través de la producción

No se ha demostrado la existencia de un sistema de calidad de la cantera. No se encontraron los documentos.

3.4.4.7 Conclusiones/riesgos

Un balasto de mala calidad tendrá una vida útil reducida y no permite conseguir una buena nivelación de la vía. Su fragilidad conllevará a una reducción de su dureza y se deshará rápidamente durante las

operaciones de bateo, lo que las volverá extremadamente difíciles de realizar (exceso de finos) y no permitirá obtener una correcta nivelación de la vía.

3.4.4.8 Acciones correctivas a poner en marcha

Se debe prohibir el uso de roca calcárea para conservar un solo tipo de balasto basáltico.

Parece necesaria la utilización de un balasto de tipo C4 en las curvas de $R \leq 200$ m, así como en los lugares donde el bateo ya sea difícil.

Disminuir el espesor de balasto por medio de una disminución de los peraltes en las curvas cerradas donde el peralte es superior a los 100mm.

En las curvas en las que se disminuirá el espesor de balasto, es conveniente sustituir el balasto si ha sido objeto de una mezcla de calcárea/basalto y remplazarlo por un balasto basáltico.

Se puede conservar el balasto en las rectas aun sabiendo que su vida útil es inferior a lo normal y que habrá de todos modos que sustituirlo antes de lo previsto inicialmente.

3.4.5 Aparatos de vía

3.4.5.1 Conformidad en relación con especificaciones técnicas

Los aparatos de la vía y los aparatos de dilatación están de conformidad con el Especificaciones técnicas.

3.4.5.2 Verificación del sistema calidad a través de la producción

Vossloh Cogifer presentó todas las pruebas referentes al seguimiento de fabricación y del sistema de calidad.

No hay comentarios particulares en referencia a la instalación de los aparatos de la vía.

3.4.5.3 Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis

Algunos aparatos presentan fallas resultantes del desgaste de las ruedas.

En ciertos aparatos muy utilizados, como en Atlatilco y Mixcoac, hay desgaste ondulatorio. Este desgaste ondulatorio es del mismo tipo que el desgaste de las curvas cerradas en el viaducto. Las fallas son equivalentes y provenientes del contacto del riel y la rueda.

La presencia de desgaste ondulatorio sobre la vía desviada de los aparatos muestra el impacto del valor del radio en este desgaste.

3.4.6 Contra-riel

3.4.6.1 Conformidad con la especificación técnica

No se ha encontrado la documentación que determine el uso de contra-rieles. Solamente se proveyeron las disposiciones técnicas (plan y dispositivo de montaje).

La justificación de este contra-riel no ha sido provista.

Las investigaciones de otras redes de metro muestran que este tipo de contra-rieles se instala, habitualmente, en las curvas con un radio $\leq 100\text{m}$ y está destinada a retener un eje en el cual la rueda exterior comienza a subir sobre el riel de la fila de radio grande.

3.4.6.2 Verificación del sistema calidad a través de la producción

El riel de contra-riel está de conformidad a la norma EN 13 674-3.

3.4.6.3 Acciones correctivas a poner en marcha después del análisis

En las curvas sencillas, el contra-riel en entrada de la curva se deberá ajustar a una abertura de 60mm, la laguna del contra-riel de salida no se modificará (45mm).

En el caso de las curvas en S:

- las lagunas de entrada del primer contra-riel serán ajustadas a una abertura de 60mm,
- para la segunda laguna de entrada el contra-riel será igualmente ajustado a 60mm,
- la laguna de salida no se modificará (45mm).

3.4.6.4 Conclusiones

Una vez disminuido el peralte, y de acuerdo a las directivas de la SNCF (peralte máximo de 78 mm) y de la RATP (uso de contra-riel únicamente para curvas de radio inferior a 100 m), el contra-riel puede ser retirado

El uso de un riel de seguridad no es necesario, ya que el tipo de viaducto construido en la Línea 12 permite el paso de un convoy (verificación dada en el capítulo de estructuras)

3.5 Examen del sistema completo de la vía férrea

Los diferentes componentes de la vía (rieles, durmientes, sistema de fijación) tomados individualmente, están conformes a las normas internacionales, con la excepción de los elementos calcáreos del balasto. Sin embargo, se encuentran en los límites de las tolerancias permitidas por dichas normas.

Las rupturas de ciertos componentes son la consecuencia del desgaste ondulatorio y no la causa de éste.

La calidad geométrica de la vía (medida y registrada por la máquina ME50 del STC) es irregular. La lectura de los registros permite evidenciar los defectos de nivelación longitudinal y transversal de la vía y la mala calidad geométrica de las soldaduras. El remplazo masivo de los durmientes en ciertas zonas ha tenido, igualmente, efectos sobre el deterioro de la geometría.

El desgaste ondulatorio está presente solamente en las curvas con radios inferiores a los 350m y en las vías desviadas de aparatos. El único punto común entre estas zonas es el **radio reducido**: los aparatos se colocan sin peralte y se recorren a una velocidad reducida.

El elemento determinante en la creación del desgaste ondulatorio es el trazado de la vía con curvas de radios inferiores a los 350m. La velocidad, la calidad baja del balasto calcáreo, el peralte excesivo y la calidad irregular de la geometría de la vía son factores agravantes pero no son la causa de la aparición del desgaste ondulatorio.

El origen del problema no parece ser un defecto de los materiales (excepto el balasto), sino un problema muy delicado de compatibilidad a nivel de la interfaz riel/rueda donde se tiene un riel que responde al estándar Arema y una rueda fabricada bajo otros estándares.

3.6 Estructura de la vía propuesto para las curvas de radio reducido

Con el fin de retardar la aparición del desgaste ondulatorio, y para controlar sus efectos, se propone utilizar un riel más pesado y de mayor dureza, con una cabeza más ancha (mayor vida útil): riel tipo UIC-60 tratado térmicamente (60 E1 350HT)

Los durmientes actuales no son compatibles con el riel propuesto (patín del riel de 150 mm en vez de los 140 mm anteriores). Es necesario pues utilizar un durmiente compatible con un sistema de fijación que permita de reducir (o incluso eliminar) el desgaste ondulatorio: uso del sistema de fijaciones VIPA. Los durmientes deberán asimismo estar equipados de zapatillas anti rozamiento (USP-Under Sleeper Pad), para limitar el desgaste del balasto. (TBA S373 USP).



CONSTRUCTION OF ASSEMBLY
PANDROL VIPA assemblies are supplied to the tracksite as assembled units. For PANDROL VIPA assemblies incorporating PANDROL FASTCLIP clips, they are also captive on the assembly when delivered to site.

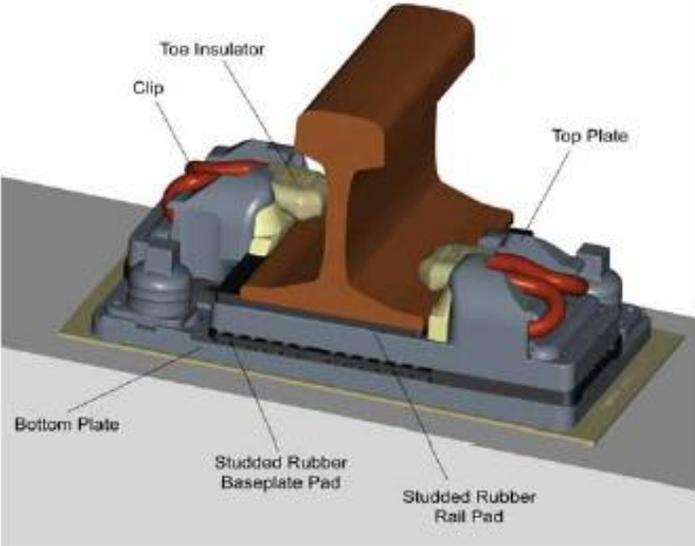


Figura 4. Système VIPA

4. MATERIAL RODANTE

4.1 Lista de documentos solicitados y recibidos

| Numero | Referencia | Documentos |
|----------------------------|---|--|
| Estructura del tren | | |
| RS_1.100 | DIBUJO DE BOGIES FE10 | Planos del bogie equipado en versión PDF y Autocad (Si varios tipos, todos los planos) |
| RS_1.102 | ENSAYO DE VALIDACIÓN DIMENSIONAL DEL TREN Y EL BOGIE FE10 | Ensayo de validación dimensional del tren y del bogie |
| RS_1.103 | BALANCE DE MASA Y ENSAYO DE PESO FE10 | Balance de la masa e informe de ensayo de peso |
| RS_1.104 | RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL BOGIE FE10 | Resistencia estructural del bogie |
| RS_1.105 | GALIBO DINÁMICO FE10 | Galibo dinámico |
| RS_1.106 | DIBUJOS DE LOS EJES FE10 | Planos de los ejes en versión PDF y Autocad |
| RS_1.108 | ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DEL BOGIE FE10 | Especificación técnica del bogie |
| Rueda | | |
| RS_2.100 | PERFIL DE RUEDA FE10 | Perfil de la rueda |
| RS_2.101 | | Características metalúrgicas de la rueda |
| RS_2.102 | DIBUJO DE LA RUEDA FE10 | Planos de las ruedas en versión PDF y Autocad |
| RS_2.103 | NOTA TÉCNICA DE LA INTERFAZ RUEDA RIEL FE10 | Nota técnica de la interfaz Riel/ rueda |
| RS_2.104 | NOTA TÉCNICA DE DEFINICIÓN DEL PERFIL DE RUEDA FE10 | Nota técnica sobre la definición del perfil de rueda |

| Numero | Referencia | Documentos |
|----------|--|---|
| RS_2.105 | ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA RUEDA FE10 | Especificaciones técnicas de la rueda |
| RS_2.106 | ESPECIFICACIÓN TÉCNICA Y FUNCIONAL DEL EQUIPO LUBRICADOR DE PESTAÑA FE10 | Especificación técnica del sistema de engrasado de las pestañas |
| RS_2.107 | ESPECIFICACIÓN TÉCNICA Y FUNCIONAL DEL EQUIPO LUBRICADOR DE PESTAÑA FE10 | Especificación funcional del sistema de engrasado de las pestañas |
| RS_2.108 | | Seguimiento de consumo del sistema de engrasado de las pestañas |
| | | Comportamiento dinámico |
| RS_3.100 | CÁLCULOS DINÁMICOS FE10 | Calculo de los modos de suspensión |
| RS_3.101 | CÁLCULOS DINÁMICOS FE10 | Calculo del coeficiente de amortiguamiento |
| RS_3.102 | C.F1.93.551_ Cálculos_Dinámicos_Ed- | Calculo de la estabilidad lineal. Calculo del amortiguamiento mínimo |
| RS_3.103 | C.F1.93.551_ Cálculos_Dinámicos_Ed- | Calculo de la estabilidad no lineal. Simulación de los ciclos limites |
| RS_3.104 | C.F1.92.244 | Calculo del rendimiento en las curvas |
| RS_3.105 | C.F1.93.551_ Cálculos_Dinámicos_Ed- | Calculo de la suma de fuerzas laterales H |
| RS_3.106 | C.F1.93.551_ Cálculos_Dinámicos_Ed- | Calculo de la relación Y/Q para cada rueda |
| RS_3.107 | C.F1.93.551_ Cálculos_Dinámicos_Ed- | Calculo de las fuerzas laterales Y_{sq} para cada rueda |
| RS_3.108 | PRUEBA DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO FE10 | Procedimiento de prueba de comportamiento dinámico |
| RS_3.109 | PRUEBA DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO FE10 | Informe de prueba de comportamiento dinámico |

| Numero | Referencia | Documentos |
|-------------------------------|--|---|
| RS_3.110 | PRUEBA DE CONFORT DINÁMICO FE10 | Procedimiento de prueba de confort dinámico |
| RS_3.111 | PRUEBA DE CONFORT DINÁMICO FE10 | Informe de prueba de confort dinámico |
| RS_3.112 | | Calculo del rendimiento "tracción" |
| RS_3.113 | 3.112 A 3.117 DESEMPEÑO EN TRACCIÓN FRENADO FE10 | Procedimiento de prueba del rendimiento "tracción" |
| RS_3.114 | 3.112 A 3.117 DESEMPEÑO EN TRACCIÓN FRENADO FE10 | Informe de prueba del rendimiento "tracción" |
| RS_3.115 | | Calculo del rendimiento "frenado" |
| RS_3.116 | 3.112 A 3.117 DESEMPEÑO EN TRACCIÓN FRENADO FE10 | Procedimiento de prueba del rendimiento "frenado" |
| RS_3.117 | 3.112 A 3.117 DESEMPEÑO EN TRACCIÓN FRENADO FE10 | Informe de prueba del rendimiento "frenado" |
| RS_3.118 | C.F1.93.552_-_Calculo Conicidad Equivalente | Calculo conicidad equivalente |
| Mantenimiento | | |
| RS_4.100 | | Documentación de mantenimiento del bogies |
| RS_4.101 | | Documento de mantenimiento preventivo de los ejes aplicado actualmente (regla de mantenimiento) |
| RS_4.102 | | Documento de perfilado de los ejes en los tornos de foso y en taller (Regla de perfilado) |
| Especificación general | | |
| RS_5.100 | PMDf-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 | Especificación ensayos generales de interfaz tren |

| Numero | Referencia | Documentos |
|--------|------------|--|
| G_10 | | Especificaciones técnicas del material rodante (incluyendo el bogie) |
| G_12 | | Respuesta a la licitación de CAF para la parte bogie y eje (Respuesta + todos los correos de las negociaciones en este tema) |
| G_4 | | Lubricación de la vía |

Tabla 14. Lista de documentos Material Rodante

4.2 Diagnóstico

4.2.1 Parque de trenes

- El parque material rodante que circula en la línea 12 se constituye de 30 trenes FE10 (realización CAF).
- Los trenes están constituidos de 7 carros con una longitud total de 141200mm:
- 2 remolques
- 5 motores
- La longitud de las cajas es de aproximadamente 19000mm
- La altura de las cajas es de 3538mm
- La anchura de la caja es de 2800mm
- La masa de un tren es de aproximadamente 235T vacío
- Estos trenes están en el sitio de mantenimiento de Tlahuac.

4.2.2 Estado de los trenes

Durante las visitas realizadas en los talleres de mantenimiento de la línea 12 (Tlahuac), SYSTRA nota una degradación anormal de las ruedas que puede conducir a un riesgo de seguridad.

En efecto, el día de la visita en los talleres de mantenimiento (10/05/2014), sobre los 30 trenes del parque:

- 11 se detuvieron en espera de re-perfilación.
- 12 trenes han sido re-perfilados y están en operación.
- 7 trenes aunque están en espera de re-perfilación, están en operación con los ejes con valores por debajo de la tolerancia de mantenimiento. Especialmente con los qR

(Coeficiente residual) de 3,6 mm mientras que el valor mínimo tolerado en servicio es de 6,5 mm.



Foto 39. Pestaña cortada / qR débil

→ El riesgo introducido por los valores de qR muy pequeños es un descarrilamiento a nivel del corazón del aparato de vía porque con un qR tan pequeño, tenemos un "acuchillamiento de la pestaña".

Con el fin de compensar la situación y de mitigar los riesgos relacionados a los pequeños valores de qR, CAF que está encargado del mantenimiento ha instalado un segundo Torno de Ruedas para absorber la cantidad de trabajo de re-perforación de las ruedas.

SYSTRA constata que las ruedas están marcadas sobre su cara interna (por lo tanto existe un contacto con el contra-riel) y que las pestañas han presentado un desgaste anormal sobre esa cara.



Foto 40. Desgaste anormal de la cara interna

En todo caso, los ejes necesitan mucho re-perfilado (en promedio cada 4 meses, o sea alrededor de los 113.000 km).

Finalmente, SYSTRA nota que el STC tiene un análisis del tiempo de vida de la ruedas y de su estado, y considera reemplazar las ruedas a partir de este año mientras que esta operación estaba inicialmente prevista en 8 años (un millón de kilómetros por tren). Un taller de reparación de las ruedas ya ha sido construido y los equipos están en curso de reparación.

Durante sus visitas, SYSTRA no preparó una relación de los puntos anormales al nivel de los bogies.

4.3 Estudios de los parámetros Material Rodante influyentes sobre la interfaz rueda/riel

4.3.1 Introducción

El comportamiento dinámico de un tren, así como la interfaz rueda/riel dependen de cierto número de parámetros que se puede analizar por separado. Sin embargo, es importante notar que los desempeños de un material rodante se tienen que analizar respecto a los compromisos que se realizarán entre los diferentes parámetros.

4.3.2 Distancia entre las caras internas (Ei) de las ruedas

4.3.2.1 Documentos de entrada

Los documentos de entrada proporcionados a SYSTRA y analizados son:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|--|---|
| PLANO PARA TORNO FOSO | M.E4.94.101 |
| CONTRACTO N°:8.07.C0 01.T.2.022 Y CONVENIOS MODIFICATORIOS | PMDf-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 |
| DOSSIER DE SALIDA DE FACTORÍA | - |
| COREO VOSSLOH | MRM LINEA 12 -2707_001 |

4.3.2.2 Comparación de los valores específicos al valor retenido por CAF

El valor de Ei del FE10 es de: 1362 +1/-0mm

Las especificaciones técnicas y la respuesta de CAF definen un valor de 1362mm. Este valor ha sido definido por Vossloh.

4.3.2.3 Comparación de la nominalización en vigor

La ficha UIC 510-2 especifica los valores de distancia siguientes:

- 1360 ± 3 mm para las ruedas de diámetro ≥ 840 mm
- 1361 ± 2 mm para las ruedas de diámetro ≤ 840 mm

4.3.2.4 Ensayos de validación de resultados

Los ensayos de fabricación al salir de la fábrica están conforme a los resultados esperados.

4.3.2.5 Valores utilizados sobre los materiales similares

4.3.2.5.1 Metros de los tipos MF67 y MF77.

Los materiales de tipos MF67 y MF77 operan sobre las líneas 3, 9, 10, 12 respectivamente y las líneas 7, 8, 13 de la red del metro de París tiene valores de Ei de 1359 +2mm / -0mm.

En cuanto al mantenimiento de estos materiales:

- Si $E_i > 1362$: Se requiere reemplazar la(s) rueda(s) o la(s) llantas.
- Si $E_i < 1359$: Se requiere mecanizar la(s) rueda(s).

4.3.2.5.2 Trenes suburbanos de tipos MS61, MI79, MI84, y MI2N.

Los materiales de tipo MS61, MI79 (Z8100), MI84 (Z8400), MI2N (Z22500) que operan en la líneas A, B, A y B, respectivamente, de la red parisina de RER tiene valores de Ei de 1359 +2mm / -0mm.

Respecto al mantenimiento de estos materiales:

- Si $E_i > 1362$: Se requiere reemplazar la(s) rueda(s).
- Si $E_i < 1358$: Se requiere mecanizar la(s) rueda(s), (excepto los bogies portadores MI2N, ver nota)

Nota: Para los bogies portadores de material tipo MI 2N, se requiere mecanizar las ruedas si el valor de $E_i < 1359$.

4.3.2.5.3 Metros de tipo MF88.

Los materiales de tipo MF88 operan en la línea 7bis de la red parisina de metro, en la que los valores de Ei son 1359 +0mm / -0,5mm.

Respecto al mantenimiento de estos materiales:

- Si $E_i > 1362$: Se requiere reemplazar la(s) rueda(s) o la(s) llanta(s).
- Si $E_i < 1357$: Se requiere mecanizar la(s) rueda(s).

4.3.2.6 Puntos Difíciles / Riesgos

Notamos que la zona de los valores de E_i se ubica en la zona alta de los valores de distancia autorizados por la norma. Sin embargo, el espesor de pestaña es menor que para los otros tipos de material rodante lo que compensa este valor elevado.

4.3.3 Distancia entre ejes del bogie

4.3.3.1 Documentos de entrada

Los documentos de entrada proporcionados a SYSTRA y analizados son:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|---|---|
| CONJUNTO BOGIE MOTOR E2 | M.E4.00.002 |
| CONJUNTO BOGIE REMOLQUE E1 | M.E4.00.501 |
| CONJUNTO BOGIE REMOLQUE E2 | M.E4.00.502 |
| CONJUNTO BOGIE REMOLQUE E1 | M.E4.00.503 |
| CONJUNTO BOGIE MOTOR E1 | M.E4.00.001 |
| CONTRACTO N°:8.07.C0 01.T.2.022 Y CONVENIOS MODIFICATORIOS | PMDf-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 |
| DOSSIER DE SALIDA DE FACTORÍA | - |

4.3.3.2 Comparación valor especificado y valor retenido por CAF

El valor de la distancia entre ejes del bogie del FE10 es de: 2500mm

Las especificaciones técnicas y la respuesta de CAF no definen valores particulares.

4.3.3.3 Comparación de la nominalización en vigor

La ficha UIC 511 impone que las distancias entre los ejes del bogie del material rodante de pasajeros están comprendidas entre 2000 y 4500 mm.



4.3.3.4 Ensayo de validación y resultados

El valor de distancia entre ejes es de 2500 mm de los bogies del FE10 respetando las disposiciones de esta ficha UIC.

Para esta medida, que depende de muchos parámetros, la validación se realiza a partir de la nota de cálculo. Los resultados obtenidos son coherentes con lo considerado.

4.3.3.5 Valores utilizados sobre los materiales similares

4.3.3.5.1 Metros de tipo MF77.

Los trenes MF77, operados sobre las líneas 7, 8 y 13 del metropolitano parisino, tienen las distancias entre ejes del bogie de 2200 mm para los bogies motores y de 2000 mm para los bogies portadores.

4.3.3.5.2 Trenes suburbanos de tipo Z20500.

Los trenes Z20500, operados sobre las líneas C y D de la red RER parisina, tienen las distancias entre ejes del bogie de 2400mm.

4.3.3.5.3 Trenes suburbanos de tipo MI2N.

Los trenes MI2N (Z22500), operados sobre la línea E de la red RER parisina, tienen las distancias entre ejes del bogie de 2450mm.

4.3.3.5.4 Metros de tipo FM86, FM95A, FE07.

Los trenes FM86, FM95A, FE07, operados sobre la línea A del metropolitano de México, tienen las distancias entre ejes del bogie de 2200 mm para los bogies motores y 2100 mm para los bogies portadores.

4.3.3.6 Puntos difíciles / Riesgos

Aunque se respetan los aspectos normativos, las distancias entre ejes de 2500 mm se sitúan en la zona alta admitida por las normas. La SNCF confirma que dichos empates, a priori, están poco adaptados a líneas con numerosas curvas de radio de 200m.

4.3.3.7 Plan de acciones

La realización de un estudio detallado que incluya la modificación de las suspensiones primarias y secundarias (para disminuir el par de fuerzas de rotación) permitirá validar si es posible facilitar la inscripción de los ejes en la vía. Este estudio hace parte de la optimización de la interfaz riel/rueda.

Ver párrafo **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

4.3.4 Distancia entre los ejes de la caja

4.3.4.1 Documentos de entrada

Los documentos de entrada proporcionados a SYSTRA y analizados son:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|---|---|
| CONTRACTO N°:8.07.CO 01.T.2.022 Y CONVENIOS MODIFICATORIOS | PMDF-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 |
| DOSSIER DE SALIDA DE FACTORÍA | - |

4.3.4.2 Comparación valor especificado y valor retenido por CAF.

El valor de distancia entre ejes de la caja del FE10 es de: 12600mm.

Las especificaciones técnicas y la respuesta de CAF definen un valor de 12600mm.

4.3.4.3 Comparación la normalización en vigor

Sin objeto.

4.3.4.4 Ensayo de validación y resultados

Los ensayos de tipos realizados en salida de fabricación están conformes.

4.3.4.5 Valores utilizados sobre de los materiales similares

4.3.4.5.1 Metros de tipo MF77.

Los trenes MF77, operados sobre las líneas 7, 8 y 13 del metropolitano parisino, tienen las distancias entre ejes de la caja de 10000 mm

4.3.4.5.2 Trenes suburbanos de tipo Z20500.

Los trenes Z20500, operados sobre las líneas C y D de la red RER parisina, tienen las distancias entre ejes de la caja de 17800 mm.

4.3.4.6 Puntos difíciles / Riesgos

El bogie de dimensionamiento no es óptimo para las líneas que tienen curvas de radios pequeños.

4.3.4.7 Plan de acciones

La realización de un estudio detallado que incluya la modificación de las suspensiones primarias y secundarias (para disminuir el par de fuerzas de rotación) permitirá validar si es posible facilitar la inscripción de los ejes en la vía. Este estudio hace parte de la optimización de la interfaz riel/rueda.

Ver párrafo **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

4.3.5 Perfil de la rueda

4.3.5.1 Documentos de entrada

Los documentos de entrada proporcionados a SYSTRA y analizados son:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|---|---|
| CONTRACTO N°:8.07.CO 01.T.2.022 Y CONVENIOS MODIFICATORIOS | PMDF-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 |
| PERFIL RUEDA NUEVA FE10 | X.06.00445_1 |
| PERFILES ECONÓMICOS FE10 | X 06 00126 01-A0 |
| PERFIL_DE_ROD FE10 | X.06.00126.01 |
| DOSSIER DE SALIDA DE FACTORÍA | - |
| Apéndice I de licitación | <i>CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DE LAS RUEDAS Y EJES DEL BOGIE</i> |

4.3.5.2 Comparación del valor especificado y valor retenido por CAF

El perfil de la rueda que se utilizó inicialmente por CAF es X.06.00126.01. Este perfil, idéntico al de la línea A, es el que se ha descrito en las especificaciones técnicas del STC en el apéndice I de la licitación **“CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DE LAS RUEDAS Y EJES DEL BOGIE”**.

Para reducir los problemas de falsa pestaña aparecidos en octubre de 2013, CAF propuso un perfil nuevo (X.06.00445_1) por requerimiento de la SCT. Este tipo de perfil, que presenta una pendiente de 15% en el extremo de la rueda, se utiliza para limitar los problemas ligados a la deformación por fluencia del metal por el envejecimiento de las ruedas.

Otros dos perfiles, que se presumen como “económicos” se utilizan para limitar la mecanización de las ruedas durante el re-perfilado (X.06.00126.02 y X.06.00126.03). Dichos perfiles son estudiados para respetar las limitaciones de seguridad y son comúnmente aceptados.

4.3.5.3 Comparación la normalización en vigor

Ficha UIC 510-2.

4.3.5.4 Ensayo de validación y resultados

La validación del desempeño de la rueda se realiza, por una parte, en base a las notas de cálculo:

- Conicidad equivalente,
- Estabilidad lineal,
- Estabilidad no lineal,
- Desempeños en curva,
- Esfuerzo a la vía ,
- Actuación relativa al riesgo de descarrilamiento.

Y por la otra parte, por medio de los ensayos de desempeño dinámico.

Los cálculos y ensayos realizados por CAF muestran que el perfil de rueda permite la operación de los FE10 sobre la línea 12 de México, sin embargo, es posible realizar optimizaciones.

4.3.5.5 Valores utilizados sobre los materiales similares

4.3.5.5.1 Metros de tipos MF67 y MF77.

Para este tipo de material, el perfil que se utiliza generalmente es el NF-F-03-402 recomendado para las curvas de radio pequeño.

4.3.5.5.2 Trenes suburbanos de tipos MS61, MI79, MI84, y MI2N.

Para este tipo de material, el perfil que se utiliza es el perfil “estándar” definido por la norma EN 13715 (véanse Anexo **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** , conforme al perfil UIC ORE S1002, excepto por el valor de 15% de la contra pendiente.

4.3.5.5.3 Metros de tipo MF88.

Para este tipo de material, el perfil utilizado es el perfil UIC ORE S1002.



4.3.5.5.4 Metros de tipo FM86, FM95A, FE07.

Para estos materiales, el perfil utilizado es el mismo que el perfil inicial de la línea 12.

4.3.5.6 *Puntos difíciles / Riesgos*

- El perfil de la rueda parece adaptarse a las líneas con curvas de radios pequeños. .
- Ver § 4.3.6.6 conicidad equivalente.

4.3.5.7 *Plan de acciones*

La realización de un estudio detallado que incluya la modificación de las suspensiones primarias y secundarias (para disminuir el par de fuerzas de rotación) permitirá validar si es posible facilitar la inscripción de los ejes en la vía. Este estudio hace parte de la optimización de la interfaz riel/rueda.

Ver párrafo **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

4.3.6 Conicidad equivalente

4.3.6.1 Documentos de entrada

Los documentos de entrada proporcionados a SYSTRA y analizados son:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|-------------------------------|-------------|
| CALCULO CONICIDAD EQUIVALENTE | C.F1.93.552 |
| PLANO PARA TORNO FOSO | M.E4.94.101 |

4.3.6.2 Comparación valor especificado y valor retenido por CAF

La conicidad equivalente se relaciona a la combinación:

- Del perfil de la rueda
- Del perfil del riel
- De la distancia entre las caras internas de las ruedas
- De la trocha de la vía

El perfil de la rueda que se utilizó inicialmente por CAF es X.06.00126.01. Este perfil, idéntico al de la línea A, es el que se ha especificado en las especificaciones técnicas de la STC en el apéndice A de la licitación “*CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DE LAS RUEDAS Y EJES DEL BOGIE*”.

4.3.6.3 Comparación a la normalización en vigor

Sin objeto.

4.3.6.4 Ensayo de validación y resultados

El documento CALCULO CONICIDAD EQUIVALENTE presenta los resultados de cálculo de la conicidad equivalente.

Es importante hacer notar que CAF ha realizado sus cálculos en base a:

- El perfil de la rueda: CAF X.06.00126.01
- El diámetro de las ruedas es de 860mm
- El perfil de riel: 115RE

- Ancho de vía (Teórico): 1.435mm
- Distancia entre Caras Internas (DCI): 1362 (+1;-0) mm
- Inclinación de rieles: 1:20

4.3.6.4.1 Explicación de la nota de cálculo en **recta**:

La nota de cálculo presenta notablemente los siguientes resultados:

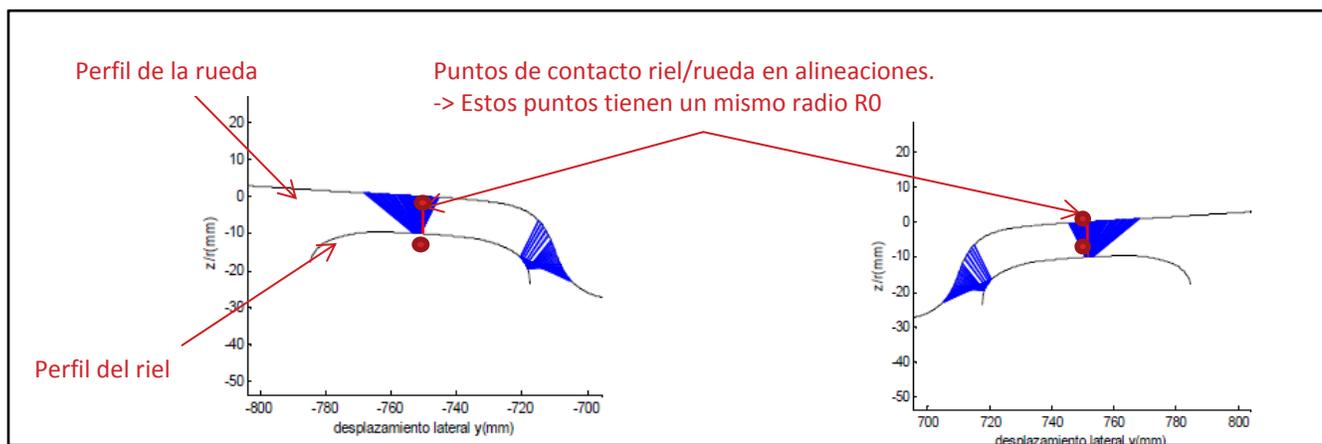


Figura 5. Contacto riel/rueda en alineacion

4.3.6.4.2 Explicación de la nota de cálculo en curvas:

4.3.6.4.2.1 Referencias:

- Sobre el FE10, las ruedas son solidarias al eje. Esto significa que la rueda derecha y la rueda izquierda no tienen siempre la misma velocidad de rotación.
- Al momento de pasar una curva, la rueda exterior tendrá que recorrer una distancia mayor que la rueda interior.

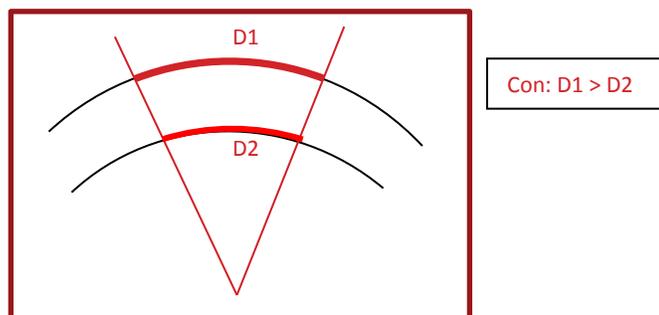


Figura 6. Diferencia G/D de la distancia a recorrer en las curvas

Asimismo, para evitar los deslizamientos al nivel de los puntos de contacto de las ruedas, el eje se colocará de tal manera que la rueda interior esté sobre un radio pequeño y la rueda exterior sobre un radio grande.

4.3.6.4.2.2 Explicación de los gráficos de la nota de cálculo:

La figura siguiente ilustra los desplazamientos de los puntos de contacto entre riel/rueda en curvas de radios pequeños hacia la derecha:

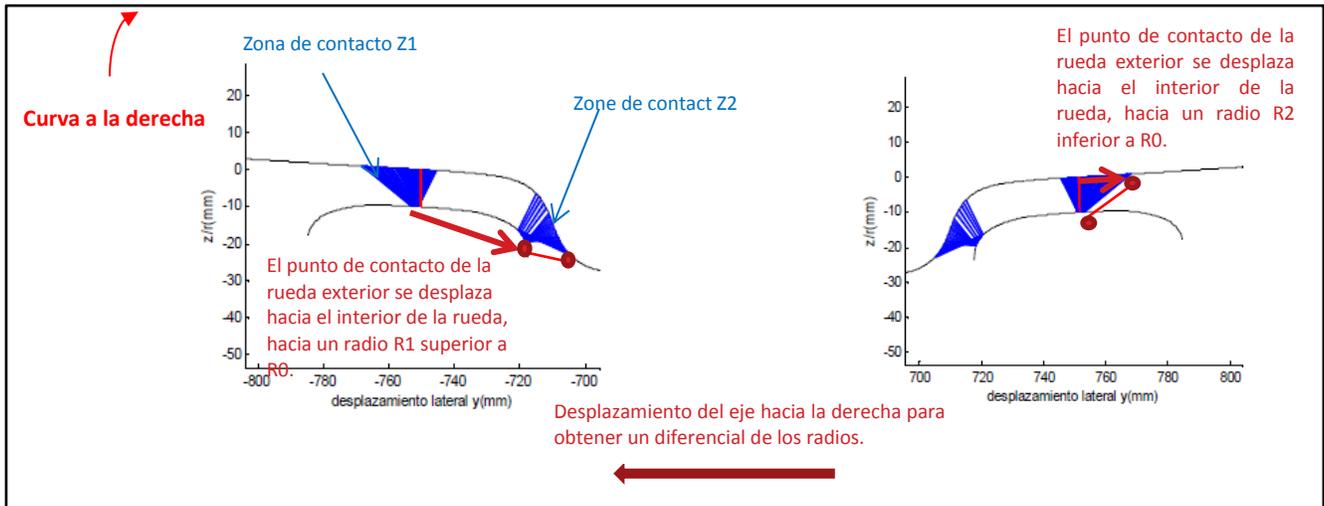


Figura 7. Contacto riel/rueda en curvas de radios pequeños "a la derecha"

El diagrama siguiente representa las diferencias de radios accesibles por los ejes de FE10.

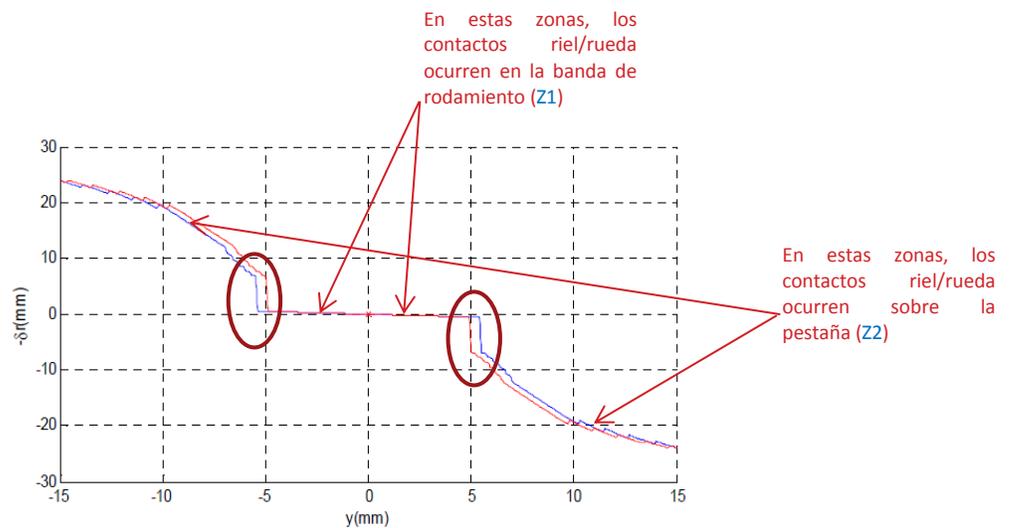


Figura 8. Diferencia de radios G/D en función del desplazamiento transversal

Se ha podido constatar que existen discontinuidades (Círculos rojos) para los desplazamientos transversales superiores a los 6mm aproximadamente (Curva azul).

Estas discontinuidades se relacionan con un desplazamiento discontinuo del punto de contacto rueda/riel de la banda de rodamiento a la pestaña.

En efecto, la interfaz entre el perfil de la rueda y el perfil del riel no permite más de dos zonas de contacto entre la rueda y el riel (Z1 y Z2).

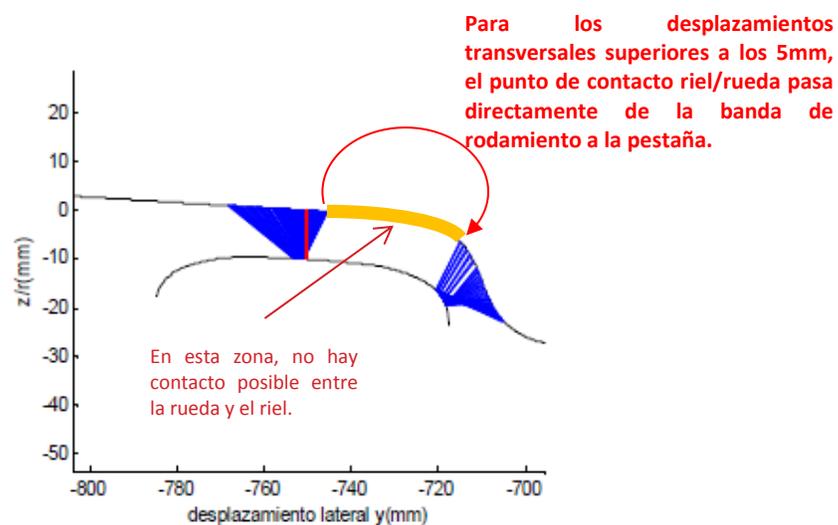


Figura 9. Desplazamiento del punto de contacto en función a los movimientos transversales del eje.

→A este tipo de perfil se le llama “bi-contacto” y se utiliza comúnmente en vías férreas.

4.3.6.4.3 Aplicación al trazado de la línea 12:

La mayoría de las curvas “críticas” de la línea 12 tienen radios de 200 m aproximadamente.

Es necesario hacer notar que la diferencia de radio entre las dos ruedas de un mismo eje en las curvas de radios de 200m debe ser de aproximadamente 3,5mm. Al observar la figura siguiente, se nota que para dicha diferencia de radio, el punto de contacto teórico se encuentra en la discontinuidad.

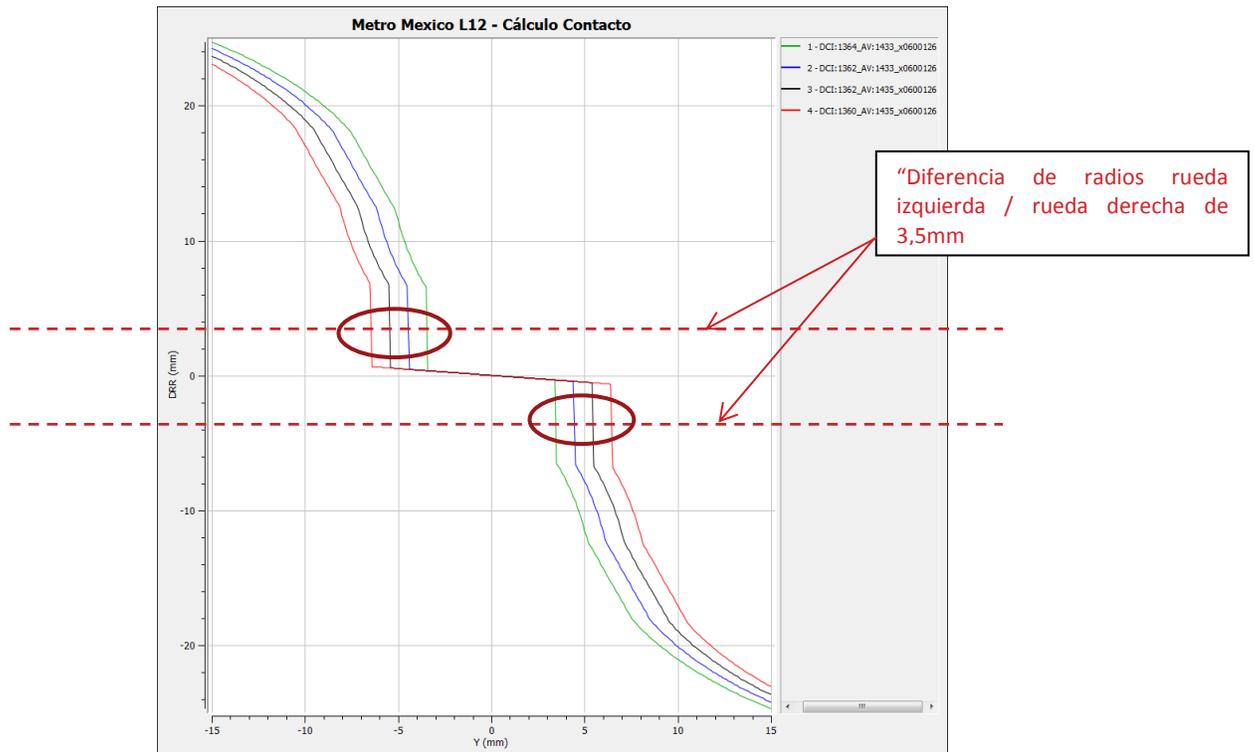


Figura 10. Análisis del desplazamiento de los ejes en las curvas de 200m

➔ El eje no podrá encontrar una posición estable que permita un diferencial adecuado.

De esto, se pueden prever tres comportamientos:

1. Los ejes no encuentran posiciones estables y saltan de la zona de contacto Z1 a la Z2 e inversamente, provocando desgastes prematuros del riel y la rueda.
2. Los ejes se ubican sobre la zona Z1 y se producen fricciones sobre las superficies de contacto (zona Z1 y tabla de rodadura) lo que implica una degradación de la banda de rodamiento de la rueda y de la tabla de rodadura del riel.
3. Los ejes se ubican sobre la zona Z2 y se producen fricciones sobre las superficies de contacto (zona Z2 y cara interna del riel) lo que puede implicar una degradación de la pestaña de la rueda y de la cara interna del riel.

El comportamiento a obtener para el eje es el número 3: Las fricciones entre el riel y la rueda en el punto de contacto se transforman en deslizamientos gracias a la lubricación del punto de contacto (en la zona Z2).

→ La calidad de la lubricación de la zona Z2 es determinante para la calidad de contacto rueda/riel, del comportamiento dinámico y del desgaste de los rieles y las ruedas.

4.3.6.5 Valores utilizados sobre los materiales similares

Sin objeto.

4.3.6.6 Puntos difíciles / Riesgos

- SYSTRA señala que los cálculos han sido realizados con las trochas nominales de la vía. Se debe tomar en cuenta un riesgo si la trocha real se sitúan en los valores bajos de tolerancia de la trocha de la vía.
- Los estudios de la SNCF confirman que la combinación de estos perfiles y de insuficiencias pequeñas derivadas de un peralte máximo de 160 mm no permite la existencia del cono equivalente suficiente para atravesar las curvas de manera cuasi-estática, donde hay un ángulo de ataque importante y esfuerzos de inscripción elevados.
- Los estudios de la SNCF confirman la discontinuidad al nivel de contacto entre la rueda y el riel en función de los desplazamientos transversales. La aparición de un doble contacto que puede conllevar desgastes prematuros.
- La calidad de la lubricación es esencial en este tipo de perfil de rueda.
- En la alineación, la conjugación de dichos perfiles con defectos de vías puede provocar desplazamientos de ejes de 6mm. Por lo tanto, el eje se colocará sobre la pestaña, provocando comportamientos “vivos” como el “bamboleo”.
- El paso de la zona Z1 a Z2 depende de la distancia de la vía y de la distancia de las ruedas. Si la distancia de vía es inferior a 1435, y si la distancia desde la rueda es superior a los 1363 (Cf. Curva verde), la superposición del eje sobre la pestaña será más rápida. (El desplazamiento transversal del eje es de 2mm aproximadamente).

4.3.6.7 Plan de acciones

SYSTRA manejará con los demás actores involucrados en la elaboración de medidas correctivas:

- El estudio del impacto de las modificaciones de los peraltes.
- El estudio de una modificación del perfil del riel por amolado o por sustitución que pueda mejorar la naturaleza de contacto al suprimir los saltos de contacto.
- El estudio de otras combinaciones del conjunto rueda/riel se deberán evaluar para verificar la mejora al paso por las curvas.

Ver párrafo **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

4.3.7 Diámetro de la rueda

4.3.7.1 Documentos de entrada

Los documentos de entrada proporcionados a SYSTRA y analizados:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|---|---|
| RUEDA Ø860 | X.03.01116 |
| RUEDA Ø860 | X.03.01163 |
| CONTRACTO N°:8.07.CO 01.T.2.022 Y CONVENIOS MODIFICATORIOS | PMDF-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 |
| DOSSIER DE SALIDA DE FACTORÍA | - |

4.3.7.2 Comparación del valor especificado y valor retenido por CAF

El perfil de rueda utilizado inicialmente por CAF es el X.06.00126.01. Este perfil, idéntico al de la línea A, es el especificado en las especificaciones técnicas de la SCT en el apéndice A de la licitación “CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DE LAS RUEDAS Y EJES DEL BOGIE”.

4.3.7.3 Comparación la normalización en vigor

La ficha UIC 510-2 impone para un diámetro de rueda dado una carga límite. En el caso de una rueda:

- de 790 mm la carga límite al eje aceptable es de 18 T/eje
- de 860 mm la carga límite al eje aceptable es de 20 T/eje

4.3.7.4 Ensayo de validación y resultados

Las pruebas de fabricación en salida de fábrica están conformes.

4.3.7.5 Valores utilizados en materiales similares

Los trenes MF77, operados sobre las líneas 7, 8 y 13 del metropolitano parisino, tienen los diámetros de las ruedas entre 860 mm para las ruedas nuevas y de 790 mm para las ruedas usadas.

Los trenes Z20500, operados sobre las líneas C y D de la red RER parisina, tienen los diámetros de las ruedas entre 1020 mm para las ruedas nuevas y de 960 mm para las ruedas usadas.

4.3.7.5.1 Metros de tipo MF67 y MF77.

Para este tipo de material, el diámetro de las ruedas nuevas es de 860mm +4/-0mm

4.3.7.5.2 Trenes suburbanos de tipo MS61, MI79, MI84, y MI2N.

Para este tipo de material, el diámetro de las ruedas nuevas es de:

| MATERIAL | DIÁMETRO |
|---------------|--------------------|
| MS motor | 1050mm +4/-0mm |
| MS portador | 900mm +4/-0mm |
| MI motor | 1020mm +4,3/-0,3mm |
| MI portador | 900mm +4,3/-0,3mm |
| MI2N motor | 920mm +4/-0mm |
| MI2N portador | 840mm +4/-0mm |

4.3.7.5.3 Metros de tipo MF88.

Para este tipo de material, el diámetro de las ruedas nuevas es de 860mm +4/-0mm

4.3.7.5.4 Metros de tipo FM86, FM95A, FE07.

Para este tipo de materiales, el perfil utilizado es el mismo que el perfil inicial de la línea 12.

4.3.7.6 Puntos difíciles / Riesgos

Sin objeto.

4.3.7.7 Plan de acciones

Sin objeto.

4.3.8 Hmax y Y/Q en dinámica

4.3.8.1 Documentos de entrada

Los documentos de entrada proporcionados a SYSTRA y analizados son:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|---|---------------|
| LISTA DE PARÁMETROS DINÁMICOS | M.E4.97.107 |
| CÁLCULOS DINÁMICOS | C.F1.93.551 |
| COMPORTAMIENTO DINÁMICOS SEGÚN UIC 518:2009 | B56.06.251.01 |

4.3.8.2 Comparación valor especificado y valor retenido por CAF

Sin objeto.

4.3.8.3 Comparación la normalización en vigor

La ficha UIC 518 trata el comportamiento dinámico de los vehículos ferroviarios e impone el respeto de los criterios siguientes:

- $H_{max} < \alpha \left(10 + \frac{P_0}{3}\right)$
- $\frac{Y}{Q} < 0,8$

El Hmax es un criterio que permite calificar la agresividad del material sobre la vía. El Y/Q es un criterio que permite cuantificar el riesgo de descarrilamiento. Cabe señalar que estos valores se aplican normalmente a los perfiles UIC.

4.3.8.4 Ensayo de validación y resultados

CAF realizó una modelización numérica de los dos tipos de vehículos que componen los trenes FE 10. Los datos de entrada e hipótesis consideradas están conformes. Se precisa que los datos de entrada son conservadores, especialmente la conicidad de las ruedas en situación degradada así como las insuficiencias de peraltes considerados.

Las simulaciones realizadas no tienen en cuenta las condiciones de cargas intermedias descritas en el documento LISTA DE PARÁMETROS DINÁMICOS. Los ensayos con condiciones de carga W2 y W3 no han sido efectuados.



Los resultados presentados son coherentes.

Las pruebas dinámicas en el tren son conformes a las condiciones descritas en la ficha UIC 518 frente a las configuraciones a probar a excepción de las configuraciones de cambio W2 y W3 y las configuraciones de las ruedas usadas.

Considerando la falta de información sobre la calidad de la vía tal como se solicitó en la ficha UIC 518, SYSTRA no se puede pronunciar sobre la conformidad de los resultados de las pruebas dinámicas.

4.3.8.5 Valores utilizados sobre los materiales similares

Sin objeto.

4.3.8.6 Puntos difíciles / Riesgos

Riesgos de esfuerzos importantes que pueden desgaste la vía.

4.3.8.7 Plan de acciones

La realización de un estudio detallado que incluya la modificación de las suspensiones primarias y secundarias (para disminuir el par de fuerzas de rotación) permitirá validar si es posible facilitar la inscripción de los ejes en la vía. Este estudio hace parte de la optimización de la interfaz riel/rueda.

Ver párrafo **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

4.3.9 Y/Q casi estático

4.3.9.1 Documentos de entrada

Los documentos de entrada proporcionados a SYSTRA y analizados son:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|-------------------------------|-------------|
| LISTA DE PARÁMETROS DINÁMICOS | M.E4.97.107 |
| CÁLCULOS DINÁMICOS | C.F1.93.551 |

4.3.9.2 Comparación valor especificados y valor retenido por CAF

Sin objeto.

4.3.9.3 Comparación la normalización en vigor

La norma EN 14363 propone un enfoque cuasi-estático del comportamiento de los vehículos. Impone especialmente el respeto del valor $Y/Q < 1,2$ frente al riesgo de descarrilamiento.

4.3.9.4 Ensayo de validación y resultados

En base a los detalles complementarios requeridos, SYSTRA estima que los resultados de los cálculos presentados en el documento CÁLCULOS DINÁMICOS (ref. C.F1.93.551) están de conformidad con lo estimado.

4.3.9.5 Valores utilizados sobre los materiales similares

Sin objeto.

4.3.9.6 Puntos difíciles / Riesgos

Ver párrafo **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

4.3.9.7 Plan de acciones

La realización de un estudio detallado que incluya la modificación de las suspensiones primarias y secundarias (para disminuir el par de fuerzas de rotación) permitirá validar si es posible facilitar la inscripción de los ejes en la vía. Este estudio hace parte de la optimización de la interfaz riel/rueda.

Ver párrafo **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

4.4 Estudios de las funciones auxiliares en interfaz con el contacto rueda/riel

4.4.1 Función antibloqueo

4.4.1.1 Documentos de entrada

Los ejes motores y portadores del FE10 están equipados con un sistema anti-atasco. Los documentos siguientes especifican las funciones así como los desempeños esperados para estos sistemas:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|--|---|
| CONTRACTO N°:8.07.CO 01.T.2.022 Y CONVENIOS MODIFICATORIOS | PMDF-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 |
| DESCRIPCIÓN BOGIE | M.E4.97.001 |
| DOSSIER DE SALIDA DE FACTORÍA | - |
| ANTIDESLIZAMIENTO | C F1 92 332 00-A- PTV |
| Freno y Gen Aire | C F1 94 302-A-DT |
| PRESTACIONES_FRENO | C F1 92 302 00-B- PTYSV |

4.4.1.2 Comparación valor especificado y valor retenido por CAF

La concepción y los desempeños de la función anti-encasquillamiento están de conformidad con las especificaciones técnicas y con la respuesta de CAF.

4.4.1.3 Comparación la normalización en vigor

La concepción y los desempeños de los sistemas de frenado y anti-encasquillamiento están de conformidad con las referencias NF EN 15595+A1 y NF EN 13452-1.

4.4.1.4 Ensayo de validación y resultados

De los ensayos de salida de la fábrica descritos en el documento DOSSIER DE SALIDA DE FACTORÍA se observa que han sido realizados y están conformes.

4.4.1.5 Valores utilizados sobre los materiales similares

Sin objeto.



4.4.1.6 Puntos difíciles / Riesgos

Sin objeto.

4.4.1.7 Plan de acciones

Sin objeto.

4.4.2 Función anti-patinaje

4.4.2.1 Documentos de entrada

Los ejes motores y portadores del FE10 están equipados del sistema anti-atasco y anti-patinaje. Los documentos siguientes especifican las funciones así como los desempeños esperados por estos sistemas:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|---|---|
| CONTRACTO N°:8.07.CO 01.T.2.022 Y CONVENIOS MODIFICATORIOS | PMDF-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 |
| DESCRIPCIÓN BOGIE | M.E4.97.001 |
| Descripción Técnica Tracción | C F1 94 301 00-B |
| Anexo HCN-L6365-11(SlipSlide_car) | C F1 94 301 00-B |
| Prestaciones Tracción.pdf | C F1 92 301 00-A |
| 03 ANEXO registros aceleración reducida | |
| 01 MELCO resultados pruebas vía | |

4.4.2.2 Comparación valor especificado y valor retenido por CAF

La concepción y los desempeños de la función anti-deslizamiento están de conformidad con las especificaciones técnicas y con la respuesta de CAF.

4.4.2.3 Comparación la normalización en vigor

Sin objeto.

4.4.2.4 Ensayos de validación y resultados

Los ensayos de tracción están de conformidad con NF EN 50215.

4.4.2.5 Valores utilizados sobre los materiales similares

Sin objeto.

4.4.2.6 Puntos difíciles / Riesgos

Sin objeto.



4.4.2.7 Plan de acciones

Sin objeto.

4.4.3 Función lubricación

4.4.3.1 Documentos de entrada

Los bogies portadores extremos del FE10 están equipados de un sistema de lubricación de pestaña. Los documentos siguientes especifican las funciones así como los desempeños esperados por estos sistemas:

| DOCUMENTO | REFERENCIA |
|---|--|
| CONTRACTO N°:8.07.CO 01.T.2.022 Y CONVENIOS MODIFICATORIOS | PMPDF-10-IEE.OP-612000-III-0246-01307-D-07 |
| DESCRIPCIÓN BOGIE | M.E4.97.001 |
| CONJUNTO BOGIE REMOLQUE E1 | M.E4.00.501 |
| CONJUNTO BOGIE REMOLQUE E1 | M.E4.00.503 |
| CÁLCULO CONICIDAD EQUIVALENTE | C.F1.93.552 |
| DOSSIER DE SALIDA DE FACTORÍA | - |
| 66804K045_M1_0 | |
| ATA16A130242B_SCHEME | |
| BPK01A030001090000_0 | |
| 2008-09-02_RST03A020500X04 | |
| ENGRASE DE PESTAÑA | C F1 92 257-A-PTYSF |
| DT ENGRASE DE PESTAÑA | C F1 94 328 00 |
| MANUAL METRO MEXICO | 832483 |
| ENGRASE DE PESTAÑA.PDF | 01_C.F1.92.257 |
| X.81.00091.DXF | |
| C.C9.04.102 | |

4.4.3.2 Comparación valor especificado y valor retenido por CAF

El sistema de lubricación definida en las especificaciones técnicas es de tipo “stick”. La respuesta de CAF está de conformidad con este requerimiento.

El sistema instalado en la FE10 no es un sistema de tipo “stick”, sino de eyección de lubricante, por lo tanto, genera una falta de conformidad respecto a las especificaciones técnicas y los requerimientos de CAF. Sin embargo, SYSTRA nota que los sistemas de lubricación de tipo “stick” aportan resultados menos adecuados que los sistemas de lubricación por eyección, y las evoluciones realizadas por CAF son acordes con la optimización de los desempeños de engrasado.

4.4.3.3 Estudios detallados del sistema de lubricación.

La norma europea de referencia para el manejo de fricciones rueda/riel es la NF EN 15427+A1 (véanse Anexo **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). SYSTRA se basará en esta referencia y en su experiencia para el estudio siguiente.

4.4.3.3.1 Relación de generalidades emitidas en la NF EN 15427+A1

Extracto de la norma:

« 4.1.1 El equipo embarcado debe aplicar el lubricante de manera que actúe sobre la interfaz activa como se describe en el párrafo 4.5. Generalmente se utiliza para aplicar lubricantes sobre la rueda. La mejor utilización de lubricantes se obtiene instalando el equipo de lubricación sobre ejes cercanos al frente del tren, de manera que se asegura la lubricación de todas las interfaces siguiente y activas de rueda/riel. La instalación óptima de este equipo es en el primer eje; sin embargo, esto puede ser imposible por falta de espacio.

La instalación y el sistema de lubricación deben ser definidos y ser objeto de un acuerdo con el cliente.

NOTA: Otros ejes pueden portar un equipo integrado, de ser necesario.

4.1.2 El equipo instalado debe estar concebido para optimizar la lubricación de la interfaz activa y limitar la contaminación de otras partes del tren o de la infraestructura. Conviene evitar la lubricación excesiva para evitar riesgos de incendio.

4.4.3.3.2 Relación de los principios de concepción

Extracto de la norma:

« 4.3 Concepción del equipo de instalado

4.3.1 Cada unidad de aplicación de lubricante debe estar colocada y alineada teniendo en cuenta los desfases de la suspensión, para garantizar la aplicación del lubricante a la interfaz activa (ver 4.5)...

De la misma manera, el sistema de lubricación debe permitir la aplicación de lubricante en las zonas “L” y/o “M” de la rueda sea cual sea el posicionamiento del eje respecto al chasis de bogie y, por lo tanto, del desfase de las suspensiones.

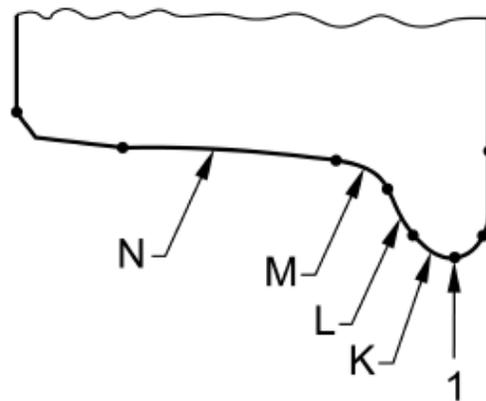
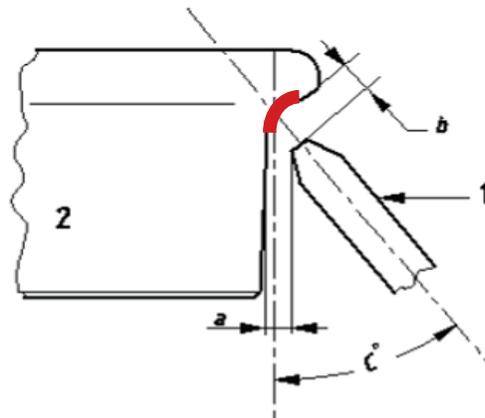


Figura 11. Zonas de una superficie de rodamiento

→ En este punto, SYSTRA precisa que las fuerzas relacionadas con la rotación de la rueda tendrán tendencia a hacer fluir el lubricante de la zona M hacia la parte alta de la pestaña (zona K). SYSTRA aconseja, por lo tanto, localizar la eyección de lubricante en la zona M.



Key

- 1 Lubricant Application Unit
- 2 wheel
- a, b, c. dimensions to be agreed between the relevant parties

NOTE 'a' and 'b' will be influenced by longitudinal and lateral suspension movements.

Figure C. 2 — Alignment of Lubricant Application Unit onto the wheel flange

Figura 12. Alineación de la unidad de aplicación de lubricante sobre la pestaña de la rueda

El contacto entre la rueda y el riel asegura la transferencia del lubricante a las zonas A y/o B del riel, a la zona C debe estar exenta de lubricación.

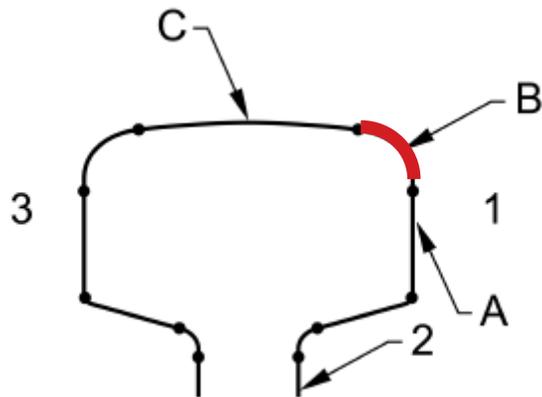


Figura 13. Zonas de una superficie de rodamiento

4.4.3.3 Comparación con la concepción del sistema de lubricación de FE10

El sistema de eyección de lubricante se constituye de conductos fijos al frente de cada rueda de cada eje de los extremos. Este sistema está fijado al chasis del bogie.

Observación n°1: Punto de lubricación

El montaje recomendado por el proveedor del sistema es el siguiente:

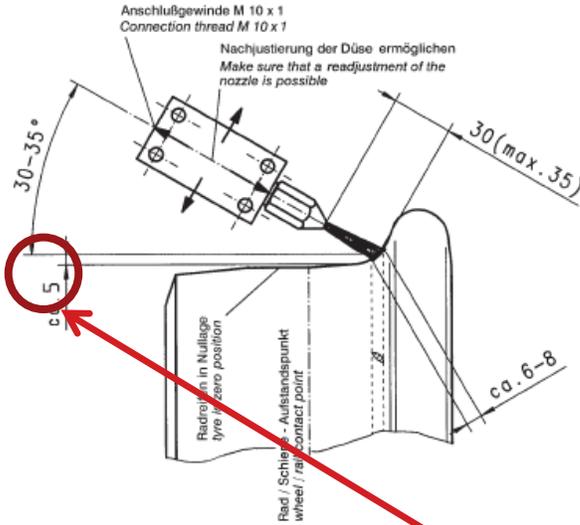
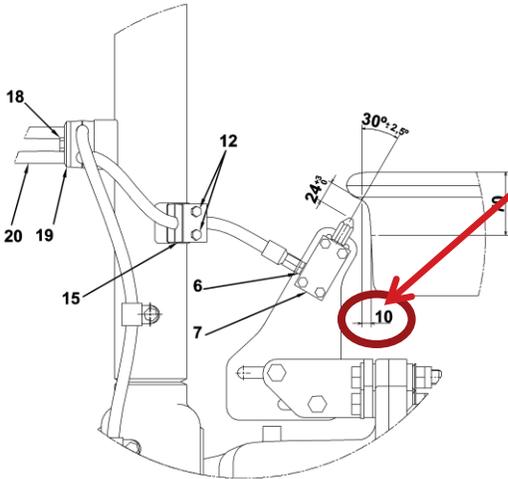


Figura 14. Preconización del proveedor para la fijación del sistema de lubricación.

El montaje realizado sobre la FE10 es el siguiente:



El montaje realizado por CAF recorre el punto de inyección hacia la parte superior de la pestaña.

Figura 15. Montaje del sistema de lubricación realizado por CAF.

De la misma manera, tras observar el dispositivo en funcionamiento sobre el FE10, el resultado es el siguiente:



Figura 16. Punto de eyección del lubricante

- ➔ En este punto, aunque el reglaje/montaje del sistema de lubricación fue realizado por CAF según las preconizaciones de la norma, SYSTRA hace notar que, en base a su experiencia y para asegurar una lubricación óptima, lo mejor sería alinear el punto de eyección al pie de la pestaña (Zona 2) de la manera preconizada por el proveedor.

Observación n°2: Alineamiento del sistema de lubricación



Figura 17. Ubicación del sistema de lubricación del FE!0

→ En este punto, SYSTRA recuerda que el sistema de eyección se instala sobre el chasis del bogie y que, debido al empuje de los bogies (2500 mm) y a la flexibilidad de las suspensiones primarias, puede aparecer un ángulo “alfa” (notablemente en las curvas de radios pequeños) y, por lo tanto, también se puede presentar un desplazamiento del punto de inyección del lubricante en la rueda.

Las consecuencias de dicho pueden ser la contaminación de la tabla de rodadura.

→ En las curvas de 200m, que se sitúan en su mayoría sobre el viaducto, SYSTRA no ha podido verificar el estado de contaminación de las ruedas de los trenes que circulan regularmente sobre esta parte de la línea. Este punto será, por lo tanto, consolidado por medio de un análisis detallado.

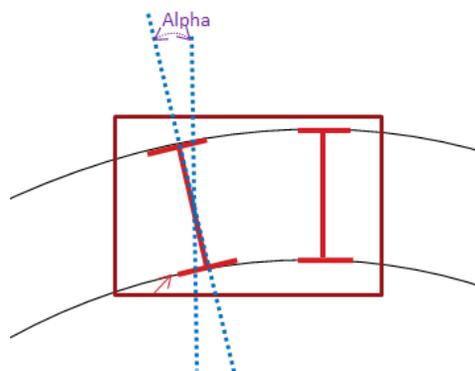


Figura 18. Desequilibrio posible en las curvas de radios pequeños

4.4.3.3.4 Utilización del sistema de lubricación

Nota importante:

No hace falta considerar que un tren lubrique la vía solamente para su propia circulación.

→ La lubricación de una línea ferroviaria es un sistema en conjunto; en este sentido, es necesario comprender que **cada tren participa en la lubricación del sistema en su conjunto**. Esta es una garantía de que la pestaña no se desgata y, por lo tanto, de la longevidad de la rueda y del riel.

El engrasado correcto con aceite “calificado” debe dejar una huella grasa en el pie de la pestaña así como al nivel de la curvatura del riel.

Nota: No hace falta eliminar esta huella grasa en las ruedas con alguna tela o cualquier otro medio de limpieza.

→ El engrasado correcto de la pestaña es un equilibrio que no se encuentra instantáneamente, pero que es necesario mantener una vez que se ha encontrado.

4.4.3.3.4.1 Cantidades y tiempos de eyección

A la fecha del análisis:

- Los tiempos de eyección son de 4s
- Los tiempos de recarga entra cada eyección son de 2.5s
- La cantidad de lubricante aplicada por eyección es de 50mm³
- La presión de eyección es de 9 bares

4.4.3.3.4.2 Evolución del funcionamiento del sistema de lubricación

El sistema de lubricación se basa en un girómetro fijado sobre la caja que detecta la inclinación de ésta.

La información transmitida ha permitido a SYSTRA establecer el siguiente historial.

En el momento de la puesta en servicio del FE10, la lubricación fue efectiva bajo las condiciones siguientes:

- Detección de una inclinación superior a los 1.8°
- Velocidad superior a los 15km/h

Problemática 1: En base a las problemáticas de “Bamboleo”, el sistema libera lubricante de forma no controlada en líneas rectas y en estaciones.

Modificación funcional 1 (Agosto 2013): El sistema de lubricación está vinculado con la señalación secundaria para restringir la lubricación, excepto en los tramos que tienen curvas. Además, se modificaron las condiciones de los ángulos.

Las condiciones de lubricación son las siguientes:

- Detección de una inclinación de entre 1.5° y 2°
- Velocidad superior a los 15km/h
- Tren dentro de un tramo en curva (s)

Problemática 2: Este sistema no permite detectar las curvas sin peralte. Por lo tanto, éstas no fueron lubricadas. Esto se refiere específicamente a las curvas 1 y 2 que tienen radios de aproximadamente 110 y 112 m respectivamente. Los tiempos de respuesta fueron muy largos.

Modificación funcional 2 (Octubre 30, 2013): el sistema de lubricación está vinculado al CBTS para autorizar de manera precisa la liberación de los lubricantes, comprendiendo las curvas sin peralte y los aparatos de vía.

Las condiciones de lubricación son las siguientes:

- Detección de una inclinación de entre 0° y 1.5°
- Velocidad superior a los 15km/h
- Tren dentro de un tramo a lubricar (tren entre PKj y PKf)

→Este sistema permite definir precisamente y con anticipación las zonas a lubricar.

4.4.3.3.4.3 Diagnóstico de las zonas de lubricación.

El análisis de las zonas lubricadas se llevó a cabo en base a las últimas modificaciones y a los datos guardados en el registro de los trenes.

Hasta hora, SYSTRA subraya que el engrasado es realizado en las curvas y aparatos de vía.

4.4.3.4 *Ensayo de validación y resultados*

Los ensayos de validación en salida de fábrica han sido realizados. Observamos que no se realizó el reglaje necesario de este dispositivo sobre la línea con el fin de tomar en cuenta las inclinaciones de caja sobre la vía en condiciones dinámicas.

SYSTRA no identificó posibles ensayos en línea que permitan garantizar el adecuado funcionamiento de lubricación de pestaña.

4.4.3.5 *Valores utilizados sobre los materiales similares*

Sin objeto.

4.4.3.6 *Puntos difíciles / Riesgos*

- SYSTRA estima que los riesgos siguientes en cuanto al sistema de lubricación:
- El punto de inyección del lubricante está muy alto sobre la pestaña, lo que conlleva un riesgo en la zona de lubricación.
- Los movimientos de los ejes conectados a las suspensiones primarias pueden tener un desfase del punto de inyección, lo que conlleva un riesgo de desplazamiento de la zona de lubricación en las curvas de radios pequeños.
- La periodicidad de 2.5s parece excesiva.

4.4.3.7 *Plan de acciones*

- Modificar el sistema de fijación si la simulación requerida anteriormente revela un desplazamiento muy grande en la zona de lubricación.
- Realizar La modificación de los ajustes del sistema de lubricación para asegurar la lubricación al nivel del pie de la pestaña.
- Tener una periodicidad de eyección de aceite en función del trazado de la línea (eyección más frecuente en curvas que en líneas rectas)
- Implementar un doble seguimiento: riel y material (ruedas, engrasantes, aceite,...).

Observación: Los conductos de eyección son más verticales que los de la SNCF, lo que es favorable para colocar el aceite en un buen lugar y que se distribuya en seguida por la

pestaña gracias a la fuerza centrífuga. Un sistema como este obtiene, de la misma manera, resultados positivos en función de la velocidad del tren.



Foto 41. Ejemplo del sistema de eyección de lubricante de la SNCF

5. OBRAS CIVILES EN EL TRAMO ELEVADO

5.1 Análisis de las obras existentes

5.1.1 Descripción

En la línea 12 del Metro de México, la estructura del tramo elevado se compone por la superestructura y la subestructura. La superestructura se compone de las traveses principales que soportan al sistema de los tableros para las vías, y la subestructura comprende desde los cabezales de apoyo hasta la cimentación.

Por las traveses se pueden clasificar dos tipos de estructuraciones en función del material utilizado para la construcción:

- la estructuración a base de traveses de estructuras metálicas cuya longitud es de 6.72 km,
- y la estructuración con traveses prefabricadas de concreto reforzado, cuya longitud es de 4.54 km.

Para los tramos elevados metálicos hay dos tipos de traveses:

- la trabe compuesta de 2 vigas de acero y una sola de concreto,
- y el tramo estructurado con dos traveses paralelas compuestas.

A lo largo de las estructuras metálicas se encuentran dos tipos de subestructuras, una a base de elementos de concreto reforzado post-tensado en columnas o cabezales, y la otra a base de elementos metálicos columnas y capiteles.



Foto 42. Trabe compuesta con columna en hormigón



Foto 43. Traveses compuestas paralelas con columna en acero

Los tramos elevados prefabricados tienen unas traveses de concreto en doble U (W), los tramos son de 30 m en línea recta y 25 m en curva, y una trabe especial de concreto en U reforzado con un cajón, el tramo es de 25 m en la sección de vías.



Foto 44. Traveses de hormigón en doble U con columna en hormigón



Foto 45. Trabe de concreto en U con cajón y columna en hormigón

5.1.2 Documentación recibida

Recibimos los documentos siguientes:

| | |
|--|--|
| Viaducto_2.100 y Viaducto_3.1001 ; viga compuesta y viga en W - tramos 30m | Memoria de cálculo con valores del propio peso, carga muerta, y carga viva |
| Viaducto_4 ; 2 vigas paralelas compuestas de acero y concreto - tramos 22 y 25m | Memoria de cálculo con valores del propio peso, carga muerta, y carga viva |
| Viaducto_5 ; 2 vigas paralelas compuestas de acero y concreto - tramos 22 y 25m | Planos |
| Viaducto_6/ 9 /12 ; viga en W - tramos 25 y 30m y trabe en estaciones | Planas "As built" |
| Viaducto_7 ; viga en W - tramos comprendidos entre 30 y 35m | Memoria de cálculo |
| Viaducto_8 ; viga en W - tramos comprendidos entre 30 y 35m | Planos |
| Viaducto_10 ; viga de concreto en U con un cajón - tramos comprendidos entre 23 y 25 m | Memoria de cálculo |
| Viaducto_11 ; viga de concreto en U con un cajón - tramos comprendidos entre 23 y 25 m | Planos |
| Viaducto_14; durmientes en concreto pretensado – diferentes tipos | Planos |
| Viaducto_15; durmientes en concreto pretensado – diferentes tipos | Planos |
| Viaducto_5.103; presentación de durmientes L-12 | Presentación Powerpoint |
| DDOC - SIP ; manual de mantenimiento ; viga compuesta ; 2 vigas compuestas ; viga en W | Documentación + Planos |
| Boletín; Memoria de cálculo durmiente de concreto monobloque pretensado | |

5.2 Evaluación por el cálculo del coeficiente de ampliación dinámico de las diferentes obras

El objetivo de este capítulo es evaluar las obras de la línea 12 del metro de México, particularmente en relación con el efecto dinámico representado por el coeficiente de ampliación dinámico de los viaductos, una simulación dinámica ha sido realizada para verificar el comportamiento bajo el paso de los trenes.

Dos tipos de tren son aplicados para el análisis dinámico, el tren normal y el tren de mantenimiento. El tren normal es tomado en consideración con una velocidad de 90 km/h en línea recta y comprendida entre 60 y 70 km/h en curva según el radio de curvatura; y el tren de mantenimiento es tomado en consideración con una velocidad de 50 km/h.

El tren normal está constituido de 7 carros con una carga al eje de 15 tones. El tren de mantenimiento está constituido de 1 carro, la carga de los ejes interiores es 17.3 tones y la carga de los cuatro ejes exteriores es 20 tones.

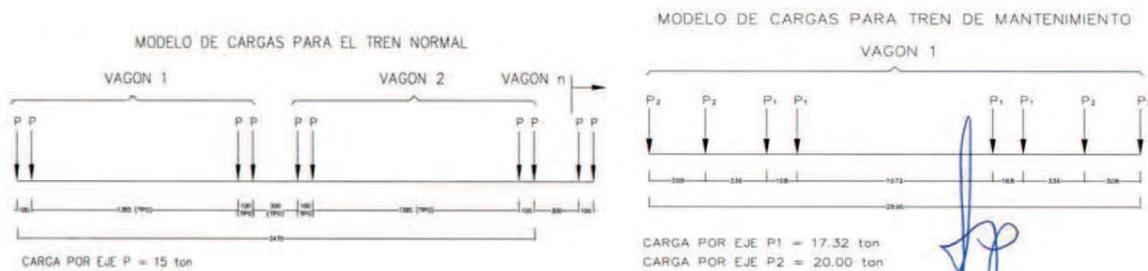


Figura 19. Cargas vivas (Tren normal y tren de mantenimiento)

Estudiamos los cuatro tipos de obras descritos en el párrafo **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** más arriba.

5.2.1 Trabe de concreto con columna en concreto

El objetivo consiste en evaluar el comportamiento dinámico de las traveses de concreto en W, y muy especialmente el coeficiente de ampliación dinámica, un análisis dinámico ha sido realizado con software Midas Civil 2012 sobre los tramos de 30 m y de 25 m, respectivamente en línea recta y en curva.

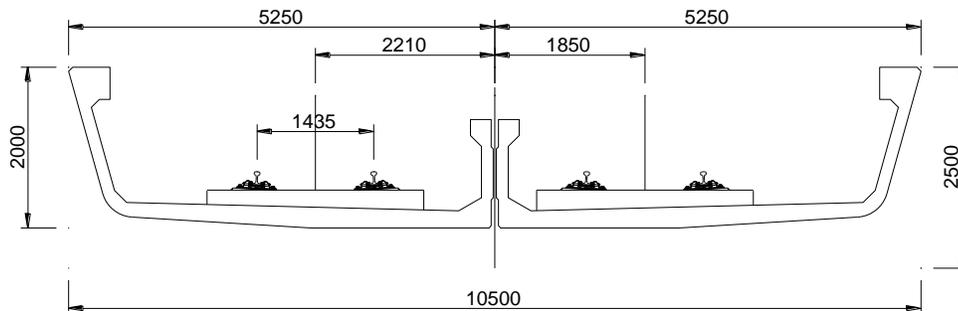


Figura 20. Sección de trabe de concreto con columna en concreto

- Concreto: $f'_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ $E_s = 3.18206 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ $w = 2.5 \text{ ton/m}^3$
- Peso propio: $w = 8.48 \text{ ton/m}$ Carga muerta: $w = 11.31 \text{ ton/m}$

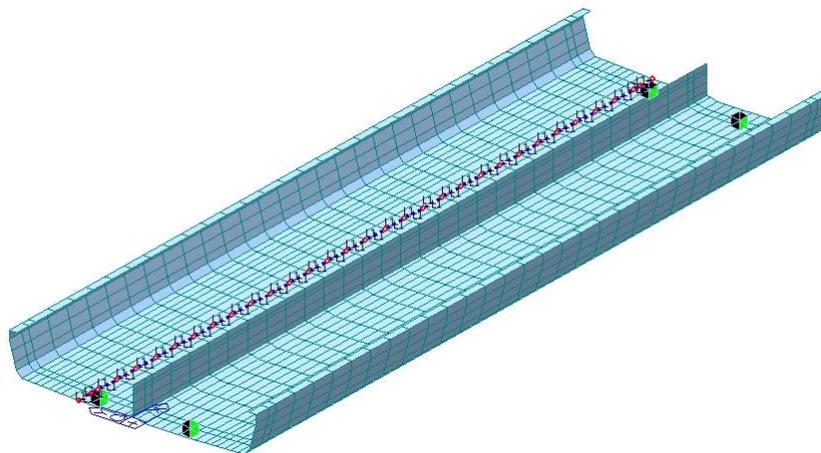


Figura 21. Modelo de cálculo: L 30 m en línea recta

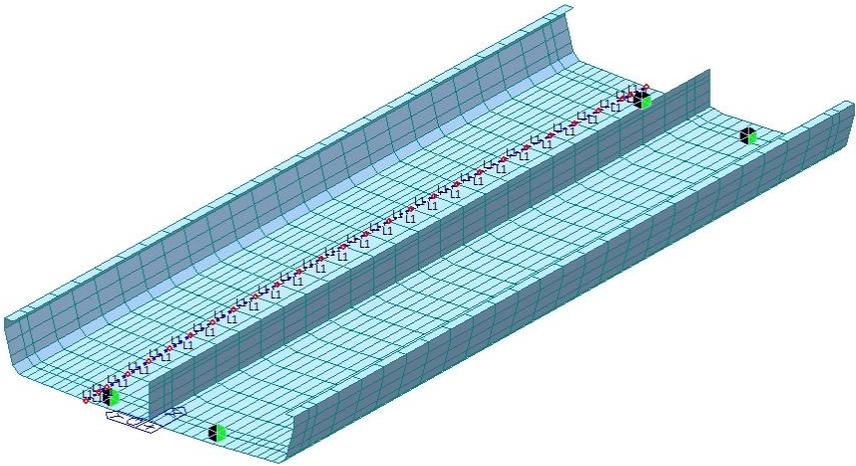


Figura 22. Modelo de cálculo: L 25m en curva con radio R = 200 m

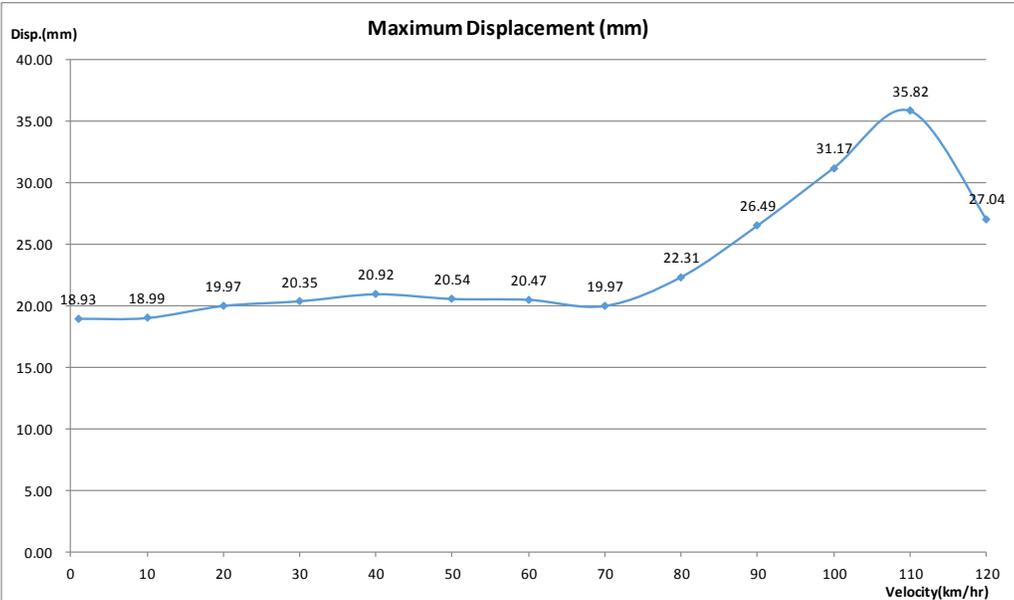
● Condiciones límites:

| SUPPORT NO. | Translation | | | Rotation | | |
|----------------------|-------------|---|---|----------|---|---|
| | X | Y | Z | X | Y | Z |
| L,R _{Begin} | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| L,R _{End} | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

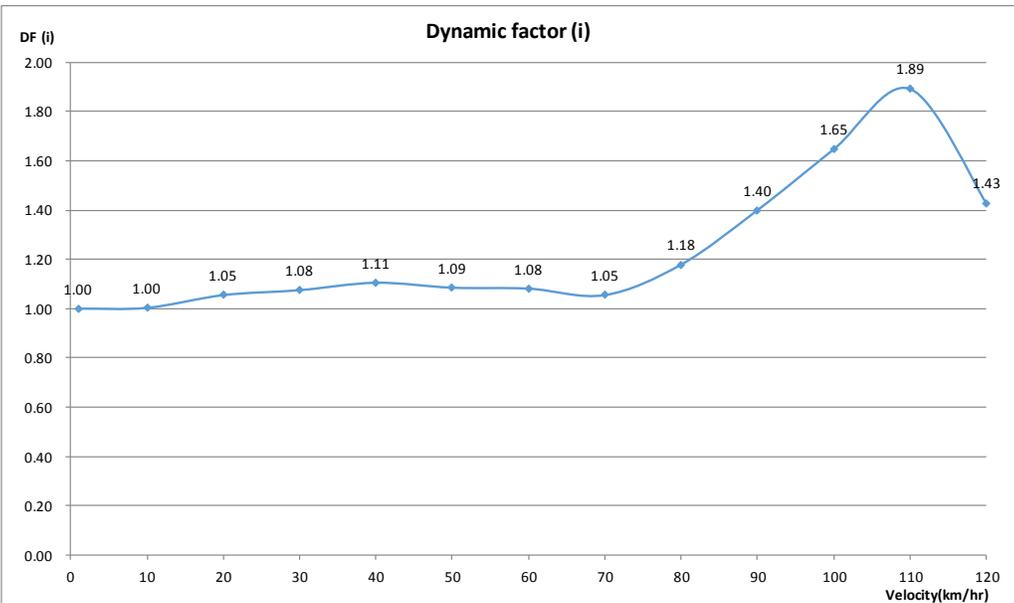
Los principales resultados son los siguientes.

- Tren normal en línea recta:

DESPLAZAMIENTO MÁXIMO RESPECTO A LA VELOCIDAD

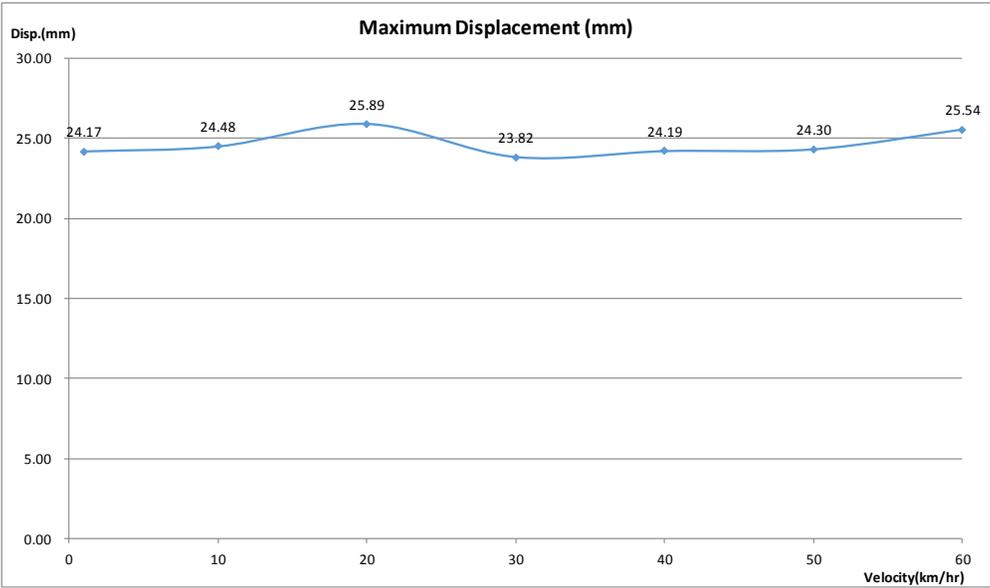


COEFICIENTE DINÁMICO RESPECTO A LA VELOCIDAD

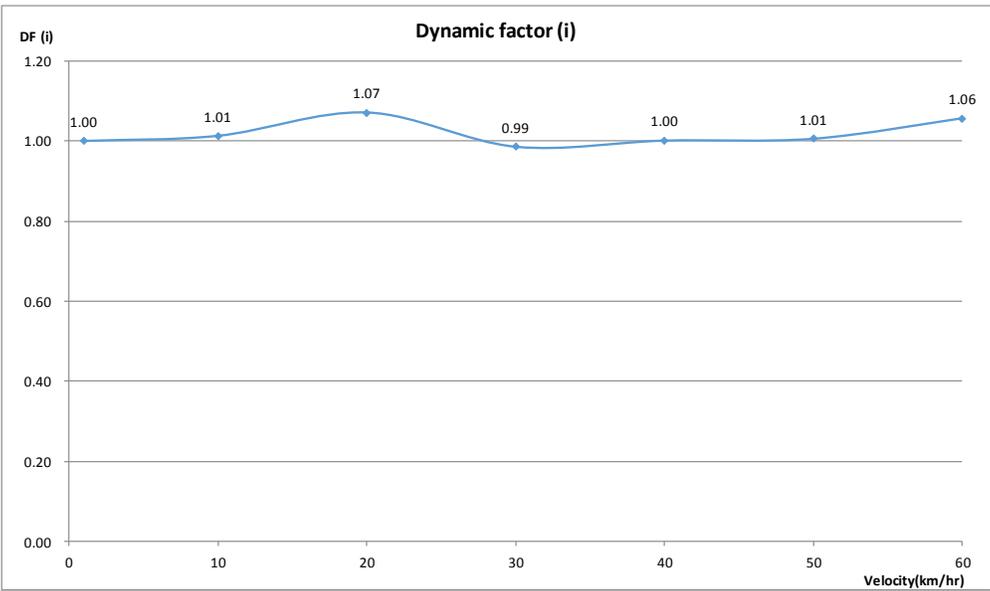


- Tren de mantenimiento en línea recta:

DESPLAZAMIENTO MÁXIMO RESPECTO A LA VELOCIDAD

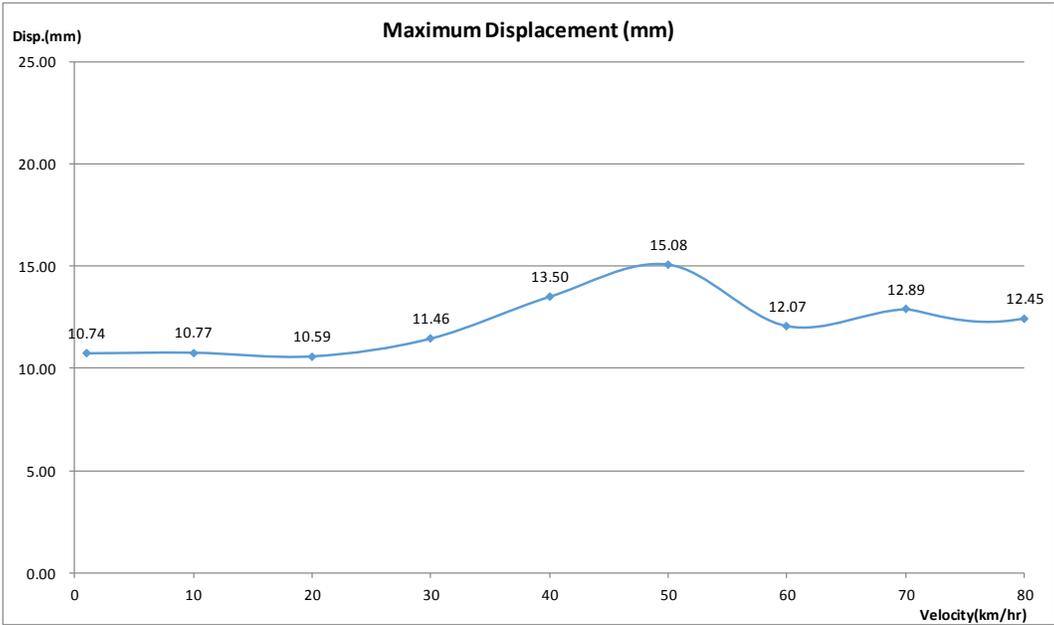


COEFICIENTE DINÁMICO RESPECTO A LA VELOCIDAD

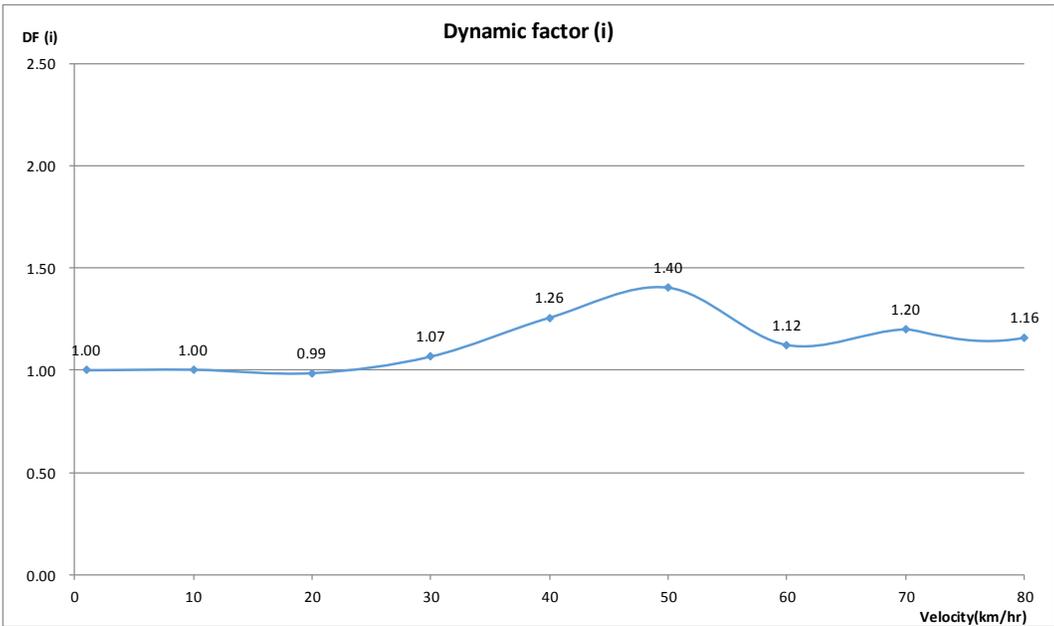


- Tren normal en curva (R = 200 m):

DESPLAZAMIENTO MÁXIMO RESPECTO A LA VELOCIDAD

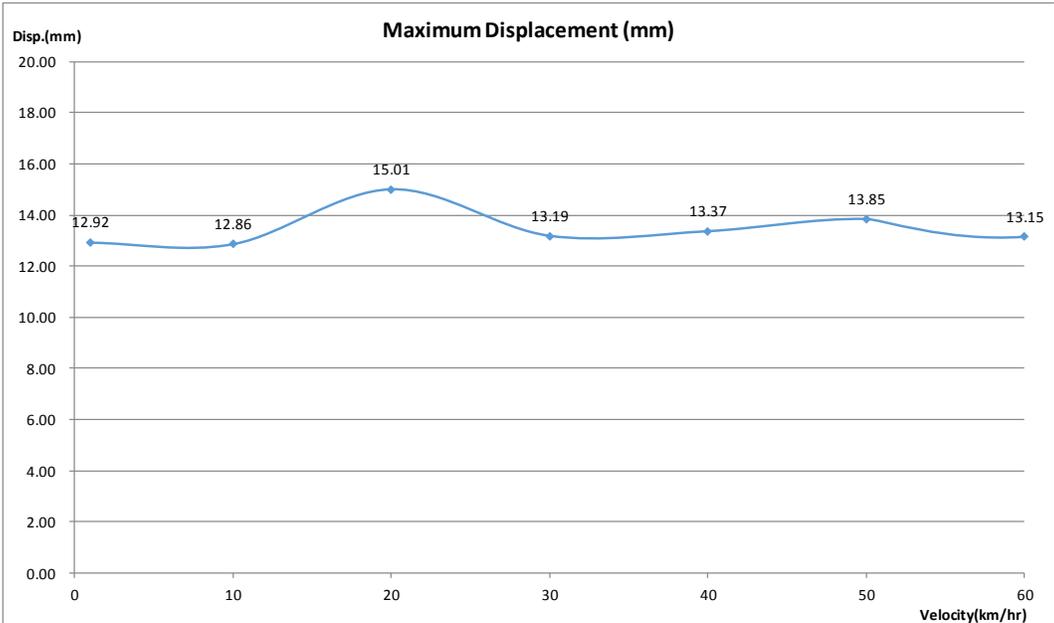


COEFICIENTE DINÁMICO RESPECTO A LA VELOCIDAD

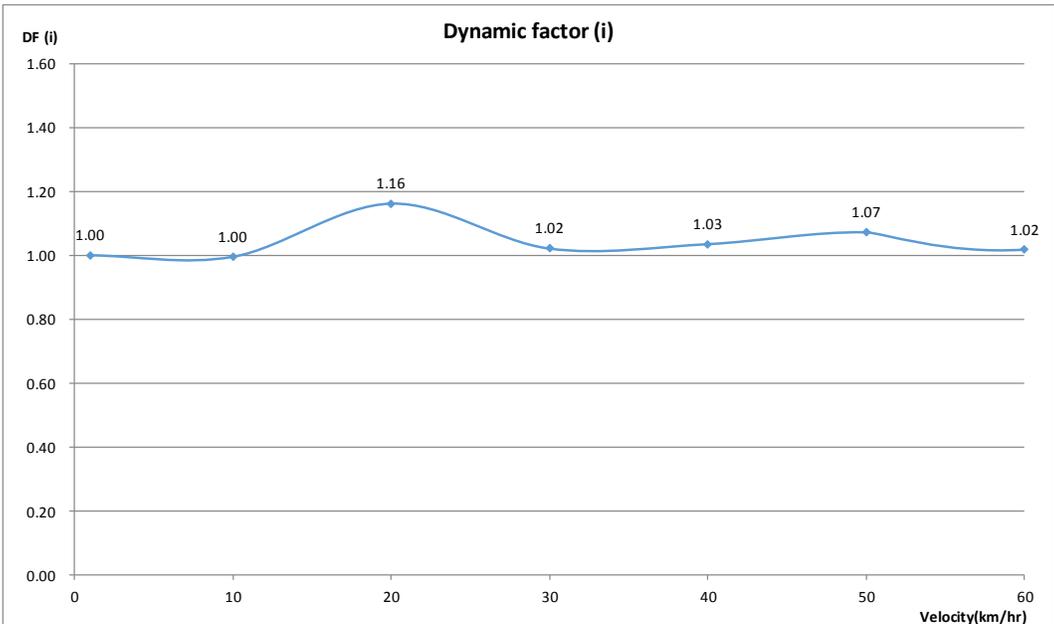


- Tren de mantenimiento en curva (R = 200 m):

DESPLAZAMIENTO MÁXIMO RESPECTO A LA VELOCIDAD



COEFICIENTE DINÁMICO RESPECTO A LA VELOCIDAD



Con radios de curvatura más grandes los resultados son similares.
El examen de los resultados es dado a continuación:

- Para el tren de mantenimiento el coeficiente dinámico es inferior que para el tren normal, aproximadamente 1.01 en línea recta y 1.07 en curva.
- Para el tren normal en línea recta (L=30m) el coeficiente dinámico respecto a la velocidad es 1.18 para una velocidad de 80 km/h y de 1.40 para una velocidad de 90 km/h. Como ya se ha comprobado el coeficiente aumenta sensiblemente para una velocidad superior a 90 km/h, tratándose de la velocidad de explotación que no debe ser sobrepasada.
- Para una velocidad de 90 km/h, el valor de 1.40 es superior al valor global de cálculo de valor 1.3, correspondiendo a un aumento del coeficiente de 8 %.
- Para el tren normal en curva (L=25m) el coeficiente dinámico respecto a la velocidad es 1.26 para una velocidad de 40 km/h y de 1.12 para una velocidad de 60 km/h. Estos valores son inferiores al valor global de cálculo de valor 1.30.

En conclusión el comportamiento de las obras de concreto en W es normal, no hay riesgo de desarrollo vibratorio bajo el paso de los trenes. No obstante, la velocidad de los trenes deberá ser limitada a la velocidad de operación, o 90 km/h, para evitar el desarrollo de las vibraciones.

5.2.2 Trabe compuesta con 2 vías

El objetivo consiste en evaluar el comportamiento dinámico de las traveses compuestas con dos vías, y muy especialmente el coeficiente de ampliación dinámica, un análisis dinámico ha sido realizado con software CEDYPIA sobre los tramos de 30 m y de 25 m, respectivamente en línea recta y en curva.

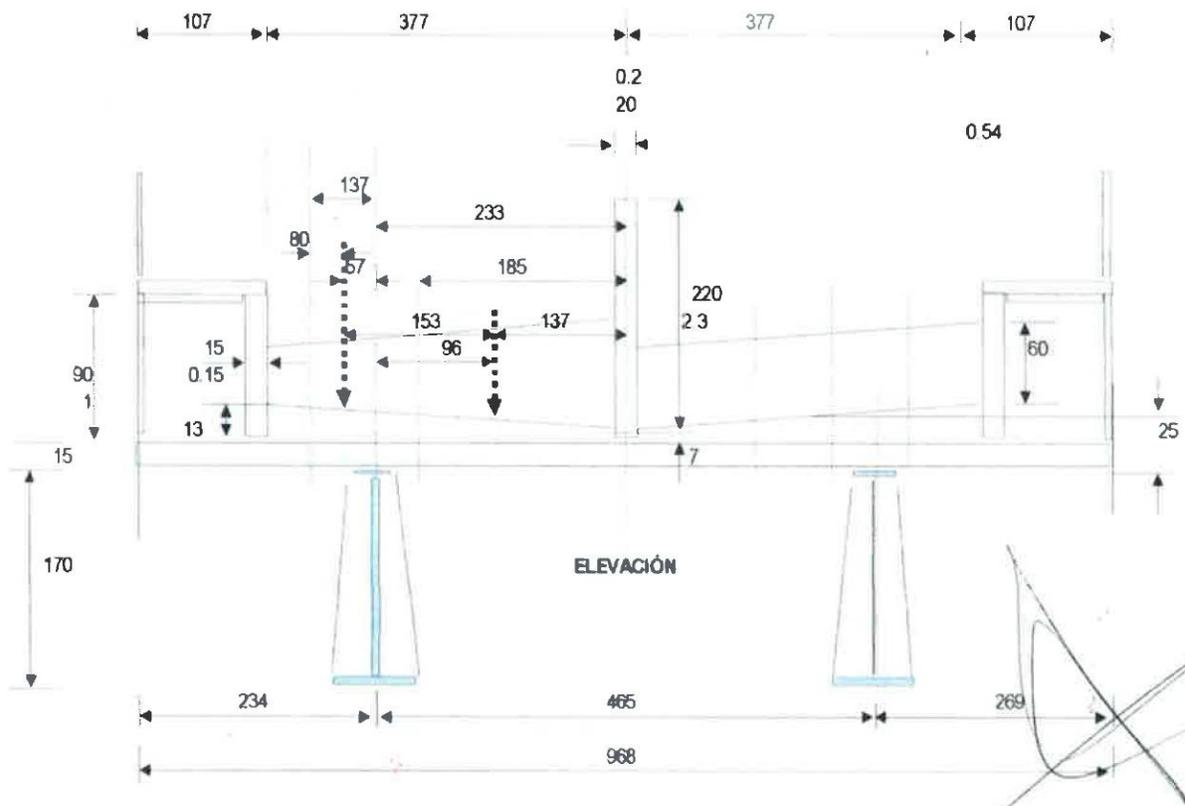


Figura 23. Sección tipo en línea recta de trabe compuesta con 2 vías

- Peso propio en línea recta: $w = 7.01 \text{ ton/m}$ Carga muerta: $w = 11.25 \text{ ton/m}$

| Para Cedypia | | | |
|--|--|----------|----------------------|
| E (módulo de elasticidad de lo acero)= | | 210000 | [MN/m ²] |
| Iy Sección homogeneizada acero= | | 0.0751 | [m ⁴] |
| L tramo= | | 30 | [m] |
| Excentricidad Carga Viva= | | 0.19 | [m] |
| Amortización= | | 0.5 | |
| Inercia polar de las masas= | | 304.9151 | [Kgm] |
| Peso propio+carga Muerta = | | 9130.752 | [kg/m] |

Tabla 15. Hipótesis de cálculo: L 30 m en línea recta

- Peso propio en curva: $w = 6.97 \text{ ton/m}$ Carga muerta: $w = 11.25 \text{ ton/m}$

| Para Cedypia | | | |
|--|--|--------|----------------------|
| E (módulo de elasticidad de lo acero)= | | 210000 | [MN/m ²] |
| Iy Sección homogeneizada acero= | | 0.0501 | [m ⁴] |
| L tramo= | | 25 | [m] |
| Excentricidad Carga Viva= | | 0.19 | [m] |
| Amortización= | | 0.56 | |
| Inercia polar de las masas= | | 239 | [Kgm] |
| Peso propio+carga Muerta = | | 9113 | [kg/m] |

Tabla 16. Hipótesis de cálculo: L 25m en curva

- Condiciones límites:

N1:

$u1x= u1y= u1z=0$ (desplazamientos bloqueados)

$\phi1x= \phi1z=0$ (rotaciones bloqueadas)

N2:

$u2x= u2y= u2z=0$ (desplazamientos bloqueados)

$\phi2x= \phi2z=0$ (rotaciones bloqueadas)

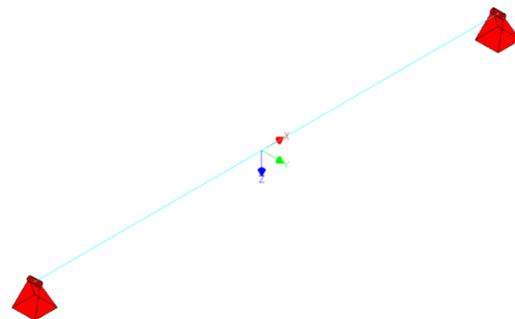


Figura 24. Esquema-referencia de desplazamientos y rotaciones

Los principales resultados son los siguientes.

- Tren normal en línea recta:

COEFICIENTE DINÁMICO CON VELOCIDAD 90 KM/H

| | |
|-----------------------------------|------------|
| My dinamico (tren normal)= | 3884 [KNm] |
| My statico (tren normal)= | 3911 [KNm] |
| ϕ= | 1 |

- Tren de mantenimiento en línea recta:

COEFICIENTE DINÁMICO CON VELOCIDAD 50 KM/H

| | |
|---|------------|
| My dinamico (tren de mantenimiento)= | 4853 [KNm] |
| My statico (tren de mantenimiento)= | 4778 [KNm] |
| ϕ= | 1 |

- Tren normal en curva:

COEFICIENTE DINÁMICO CON VELOCIDAD 60 KM/H

| | |
|-----------------------------------|------------|
| My dinamico (tren normal)= | 4178 [KNm] |
| My statico (tren normal)= | 3162 [KNm] |
| ϕ= | 1.32 |

- Tren de mantenimiento en curva:

COEFICIENTE DINÁMICO CON VELOCIDAD 50 KM/H

| | |
|---|------------|
| My dinamico (tren de mantenimiento)= | 3708 [KNm] |
| My statico (tren de mantenimiento)= | 3639 [KNm] |
| ϕ= | 1.0 |



El examen de los resultados es dado a continuación:

- Para el tren de mantenimiento el coeficiente dinámico es igual a 1.0 en línea recta y en curva.
- Para el tren normal en línea recta (L=30m) coeficiente dinámico es 1.00 para una velocidad de 90 km/h.
- Para el tren normal en curva (L=25m) coeficiente dinámico es 1.32 para una velocidad de 60 km/h. Este valor es equivalente al valor de cálculo 1.30.

En conclusión el comportamiento de las obras compuestas de dos vías es normal, no hay riesgo de desarrollo vibratorio bajo el paso de los trenes.

5.2.3 Trabes compuestas (dos paralelas) con una vía

El objetivo consiste en evaluar el comportamiento dinámico de las trabes compuestas de una vía, y muy especialmente el coeficiente de ampliación dinámico, un análisis dinámico ha sido realizado con software CEDYPIA sobre los tramos de 25 m en curva.

- Sección tipo en curva:

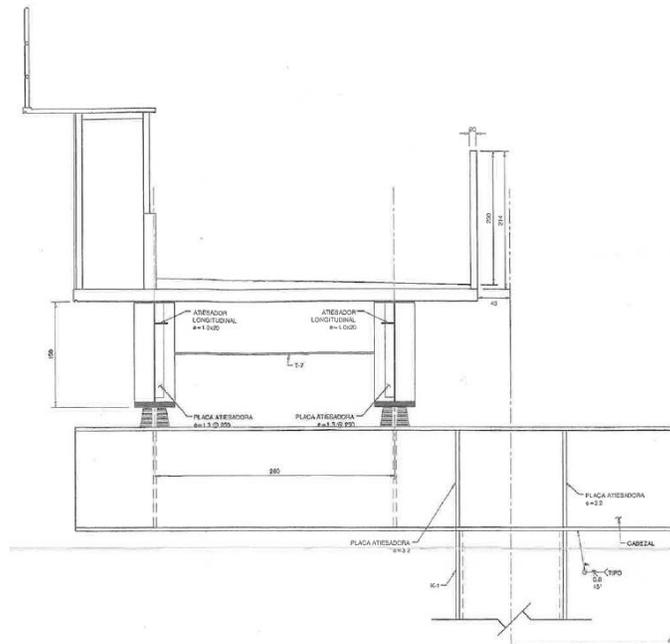


Figura 25. Sección tipo en curva de trabes compuestas (dos paralelas) con una vía

- Peso propio en curva: $w = 3.61 \text{ ton/m}$ Carga muerta: $w = 5.63 \text{ ton/m}$

| Para Cedypia | | |
|--|----------|----------------------|
| E (módulo de elasticidad de lo acero)= | 210000 | [MN/m ²] |
| Iy Sección homogeneizada acero= | 0.0501 | [m ⁴] |
| L tramo= | 25 | [m] |
| Excentricidad Carga Viva= | 0.61 | [m] |
| Amortización= | 0.56 | |
| Inercia polar de las masas= | 261.3779 | [Kgm] |
| Peso propio+carga Muerta = | 7432.132 | [kg/m] |

Tabla 17. Hipótesis de cálculo: L 25m en curva

- Condiciones límites:

N1:

$u1x= u1y= u1z=0$ (desplazamientos bloqueados)

$\phi1x= \phi1z=0$ (rotaciones bloqueadas)

N2:

$u2x= u2y= u2z=0$ (desplazamientos bloqueados)

$\phi2x= \phi2z=0$ (rotaciones bloqueadas)

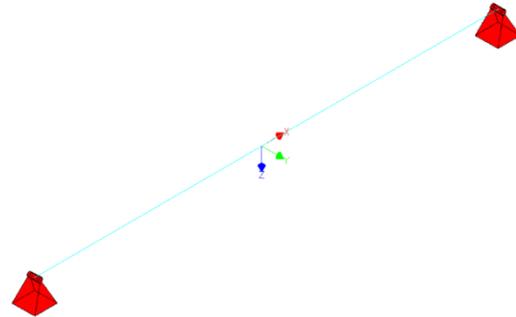


Figura 26. Esquema-referencia de desplazamientos y rotaciones

Los principales resultados son los siguientes.

- Tren normal en curva:

| COEFICIENTE DINÁMICO CON VELOCIDAD 60 KM/H | |
|--|------------|
| My dinamico (tren normal)= | 1674 [KNm] |
| My statico (tren normal)= | 1581 [KNm] |
| ϕ= | 1.059 |

- Tren de mantenimiento en curva:

| COEFICIENTE DINÁMICO CON VELOCIDAD 50 KM/H | |
|---|------------|
| My dinamico (tren de mantenimiento)= | 1888 [KNm] |
| My statico (tren de mantenimiento)= | 1819 [KNm] |
| ϕ= | 1.038 |

El examen de los resultados es dado a continuación:

- Para el tren de mantenimiento el coeficiente dinámico es ligeramente inferior que para el tren normal, aproximadamente 1.04 en curva.
- Para el tren normal en curva (L=25m) coeficiente dinámico es 1.06 para una velocidad de 60 km/h. Este valor es inferior que el valor global de cálculo que vale 1.30.

En conclusión el comportamiento de las obras compuestas de un vía es normal, no hay riesgo de desarrollo vibratorio bajo el paso de los trenes.

5.2.4 Trabe de concreto en U con cajón

El objetivo consiste en evaluar el comportamiento dinámico de las traveses de concreto con un cajón, con dos vías, y muy especialmente el coeficiente de ampliación dinámico, un análisis dinámico ha sido realizado con software CEDYPIA sobre los tramos de 23 m en línea recta.

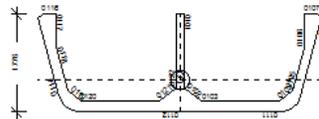


Figura 27. Sección tipo de trabe de concreto en U con cajón

- Peso propio en línea recta: $w = 7.96 \text{ ton/m}$ Carga muerta: $w = 10.25 \text{ ton/m}$
- Hipótesis de cálculo: L 23 m en línea recta

| Para Cedypia | |
|--|----------------------------|
| E (módulo de elasticidad de lo acero)= | 35000 [MN/m ²] |
| I _y = | 0.5980 [m ⁴] |
| I _x = | 4.8600 [m ⁴] |
| L tramo= | 23.14 [m] |
| Excentricidad Carga Viva= | 1.125 [m] |
| Y= | 25 [KN/m ³] |
| Amortización= | 1 |
| Inercia polar de las masas= | 13645 [Kgm] |
| Peso propio+carga Muerta = | 18210 [kg/m] |

Tabla 18. Hipótesis de cálculo: L 25m en curva

- Condiciones límites:

N1:

$u_{1x} = u_{1y} = u_{1z} = 0$ (desplazamientos bloqueados)

$\phi_{1x} = \phi_{1z} = 0$ (rotaciones bloqueadas)

N2:

$u_{2x} = u_{2y} = u_{2z} = 0$ (desplazamientos bloqueados)

$\phi_{2x} = \phi_{2z} = 0$ (rotaciones bloqueadas)

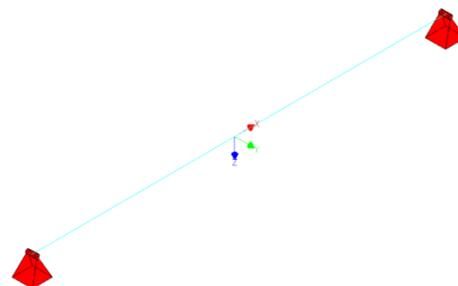


Figura 28. Esquema-referencia de desplazamientos y rotaciones

Los principales resultados son los siguientes.

- Tren normal en línea recta:

| COEFICIENTE DINÁMICO CON VELOCIDAD 90 KM/H | |
|--|------------|
| My dinamico (tren normal)= | 3284 [KNm] |
| My statico (tren normal)= | 2884 [KNm] |
| ϕ = | 1.14 |

- Tren de mantenimiento en línea recta:

| COEFICIENTE DINÁMICO CON VELOCIDAD 50 KM/H | |
|--|------------|
| My dinamico (tren de mantenimiento)= | 3405 [KNm] |
| My statico (tren de mantenimiento)= | 3293 [KNm] |
| ϕ = | 1.03 |

El examen de los resultados es dado a continuación:

- Para el tren de mantenimiento el coeficiente dinámico es inferior que para el tren normal, aproximadamente 1.03 en línea recta.
- Para el tren normal en línea recta (L=23m) coeficiente dinámico 1.14 para una velocidad de 90 km/h. Este valor es inferior al valor global de cálculo que vale 1.30.

En conclusión el comportamiento de las obras en U con cajón es normal, no hay riesgo de desarrollo vibratorio bajo el paso de los trenes.



5.2.5 Conclusión sobre el comportamiento de los traveses

Por los traveses de concreto en W en línea recta y por los traveses compuestos con dos vías en curva, el coeficiente dinámico obtenido para el tren normal es más grande que el coeficiente de cálculo, pero el aumento del coeficiente es débil. Esta aumentación no explica los problemas de vibraciones observadas sobre la línea 12 en elevación. Todos los demás coeficientes obtenidos por las diferentes traveses son inferiores a los coeficientes de cálculo.

Hay que anotar que la velocidad en línea recta no debe sobrepasar la velocidad de explotación que es 90 km/h, porque los coeficientes son mucho más importantes para velocidades superiores, especialmente en el caso de las obras en concreto W.

En conclusión el comportamiento de las obras es normal, no hay riesgo de desarrollo vibratorio bajo el paso de los trenes.

5.3 Inspección de las obras

La inspección de las obras comprende el tramo de línea donde el servicio al viajero ha sido suspendido (viaducto).

La inspección se realizó los días 12 y 13/05/2014 sobre el tramo elevado de la línea 12:

- al comienzo de la parte elevada cerca de la estación Culhuacán desde la estación de Los Olivos,
- entre las estaciones de Tlaltenco y de Los Olivos.

Esta inspección permite presentar el estado en que se encuentran actualmente las zonas objeto de la misma.

5.3.1 Constataciones generales

El análisis pone en evidencia daños y desordenes de diferentes partes de las obras. Los principales defectos son los siguientes:

- Problema de drenaje y fugas,
- Variación de color del concreto, aspecto de las tabletas prefabricadas,
- Fisuras y grietas,
- Calidad de los sellados de mortero a la extremidad de los capiteles,
- Irregularidad de geometría y defectos de nivel de los tramos adyacentes.

Las constataciones realizadas sobre la parte elevada están repartidas sobre toda la longitud del viaducto.

5.3.2 Examen de las obras y principales defectos

5.3.2.1 Problema de drenaje y fugas

La disposición del drenaje no es perfecta, debido a la ausencia de equipamientos específicos entre los tramos para la evacuación del agua y de la lluvia. El agua gotea al nivel de la junta entre tramos, los defectos se acumulan sobre la longitud del viaducto.



Foto 46. Problema de drenaje entre dos tramos

También se observa un tubo debajo de la losa con defectos de impermeabilidad.



Foto 47. Drenaje con un tubo debajo de la losa

Además se observa que los anclajes de los postes de catenaria que están debajo de la losa presentan defectos de impermeabilidad.



Foto 48. Anclaje de poste de catenaria debajo de la losa

- Aspecto y variación de color del concreto.

Existen problemas de variación de color del concreto sobre las vigas y las tabletas, lo que no es normal para piezas prefabricadas.



Foto 49. Variación de color del concreto no uniforme sobre vigas y tabletas

- Fisuras y grietas.

Se observa una fisura del concreto sobre una viga y también hay fisuras sobre el mortero de sellado de los anclajes del pretensado.



Foto 50. Fisuras del concreto y del mortero de sellado

- Calidad de los sellados de mortero en la extremidad de los capiteles.

Los sellados de mortero de los anclajes en la extremidad de los capiteles están dañados, esto es probablemente debido a la calidad del mortero utilizado. Estos defectos afectan a ciertas zonas del viaducto.



Foto 51. Calidad de los sellados de mortero en la extremidad de los capiteles

- Irregularidad de la geometría y defectos de nivel de los tramos adyacentes.

Los segmentos en U con cajón inferior, en las zonas de aparatos de vía, están bastante mal ajustados. También hay problemas de posicionamiento de los tramos prefabricados en las zonas de curvatura en plano



Foto 52. Irregularidad de geometría de los segmentos y tramos prefabricados

Además se observa un problema de flecha en un tramo cerca de la estación Lomas Estrellas. La flecha es excesiva y se acompaña de una rotación en la extremidad del tablero al nivel del tramo adyacente.



Foto 53. Flecha excesiva de un tramo y una rotación de la extremidad

Se observan también un problema de quebrado del patín inferior de una viga de acero, cerca del apoyo.



Foto 54. Patín inferior con acero quebrantado

5.4 Verificación del diseño de los durmientes pretensados

La memoria de cálculo de los durmientes en concreto monobloque está basada en las normas AREMA.

El examen de la memoria de cálculo de los durmientes pretensados permitió verificar la justificación de los durmientes: los momentos de flexión de diseño, las propiedades de los durmientes, y el cálculo estructural. La memoria de cálculo confirma la capacidad estructural de los durmientes con las solicitaciones de las especificaciones funcionales.

Cabe notar que las especificaciones AREMA recomiendan un espesor mínimo del balasto comprendido entre 200 y 330 mm para durmientes de estas dimensiones.

El análisis del informe de Rocla Concrete Tie Inc. sobre la mezcla del concreto de los durmientes muestra que la cantidad de cemento es importante, comprendida entre 450 y 480 kg/m³. Este valor permite obtener una resistencia del concreto antes de 2 días, lo que es suficiente para acelerar el ciclo de producción, pero tiene como desventaja dar un concreto que tiene un calor fuerte de hidratación.

5.5 Fisuras malladas de los durmientes en concreto

Tenemos planos de los durmientes y una presentación realizada por ICA / PRET sobre el proceso de fabricación de los durmientes. En esta presentación se presenta la problemática de los defectos encontrados en los durmientes de concreto pretensado.

La falla que afecta a 10626 piezas es una fisura mallada (mapeo, véanse **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La experiencia muestra que este defecto principalmente se encuentra en concretos de gran volumen y en concretos prefabricados, donde la temperatura en el corazón del concreto fue muy significativa.



Foto 55. Fisura mallada de un durmiente de concreto

Varias condiciones deben ser cumplidas para ocasionar la patología y las fisuras malladas (mapeo): la temperatura elevada, la naturaleza y la cantidad del cemento y el medio ambiente húmedo. Estas son las condiciones que se encuentra en las piezas prefabricadas, durante la cura el hormigón es estofado bajo una cubierta, y el fenómeno es un inflamiento del hormigón en su corazón por formación diferida de estringita (DEF).

En la presentación se dice que tomaron cuatro muestras de durmientes de concreto con la problemática y se sometieron a un examen petrográfico para determinar la posible causa de la formación de fisuras. Estas muestras fueron enviadas al Centro de Investigación para el concreto CTL en Chicago, U.S.A. Después de una serie de análisis se concluyó sobre la existencia de pasta consiste en la hidratación normal del cemento portland y poseyó abundancia de cemento en las mezclas, además hubo evidencias de expansión interna debido a formación diferida de estringita (mapeo) y el retraso de la formación de estringita en durmientes de las muestras 3 y 4.

Para SYSTRA la presencia de estringita en ciertos durmientes es la prueba que se trata de una formación diferida de estringita (DEF).

5.6 Grietas de las vigas en concreto

Durante las visitas de las obras también observamos grietas sobre las vigas en concreto (Trabe de hormigón en W).

6. ANÁLISIS DEL MANTENIMIENTO DE VÍA Y MATERIAL RODANTE

6.1 Análisis del documento de mantenimiento de la Vía Férrea (manual de mantenimiento)

El documento PMDF-11-VI.8-61 2000-II-0062-50789-E-00 define el mantenimiento corriente a realizar en la línea.

En particular, se define la trocha de las vías principales:

- 1435mm +3/-2
- 1439 para $R < 75m$.

Por lo tanto, podemos deducir que la trocha de vía tiene un valor de 1435mm para un radio comprendido entre $75m < R \leq \infty$, tratándose de una contradicción a la normativa UIC (UIC 710) que define una sobre-trocha en curva:

- $175m > R \geq 150m - 1435mm$
- $150m > R \geq 125m - 1440mm$
- $125m > R \geq 100m - 1445mm$

Este punto es importante para las curvas situadas en los talleres de Tlahuac y la estación de Tlahuac.

Este documento define los turnos de vigilancia y de mantenimiento de los alineamientos rectos y de los aparatos de vía.

En el documento faltaría:

- el mantenimiento preventivo a realizar antes de la puesta en servicio (amolado preventivo)
- los procedimientos de trabajo
- los procedimientos de seguimiento de las intervenciones realizadas
- los métodos de corrección de los defectos de la vía:
 - nivelación longitudinal y transversal de la geometría de la vía,
 - utilización de sistemas de bateo pesados,
 - reemplazo de los rieles, reemplazo de los durmientes,
 - realización de las soldaduras,
 - corrección de los defectos de las soldaduras,
 - mantenimiento del contra-riel.
- Las acciones a llevar a cabo en caso de incidente:
 - ruptura del riel,
 - durmientes rotos,

- ruptura de fijaciones,
- En particular, no se ha encontrado ninguna medida para el tratamiento del desgaste ondulatorio.

El documento es demasiado escueto para garantizar un mantenimiento eficaz de las instalaciones.

6.1.1 Recepción de las obras y mantenimiento realizado

Los análisis realizados muestran la mediocre calidad de la vía así como errores importantes en su instalación (por ejemplo, las partes móviles de los aparatos de vía situados antes de la estación de San Andrés están colocados en las juntas del viaducto)

En el manual de mantenimiento, se menciona que se tiene que respetar el galibo para asegurar la seguridad de la circulación. La curva n°17 (PK 11+735) es representativa de una deficiente instalación de la vía, ésta se encuentra sujeta mediante piezas de madera (entre el durmiente de concreto y el viaducto) para garantizar la implantación de la vía y el respeto del galibo dinámico.

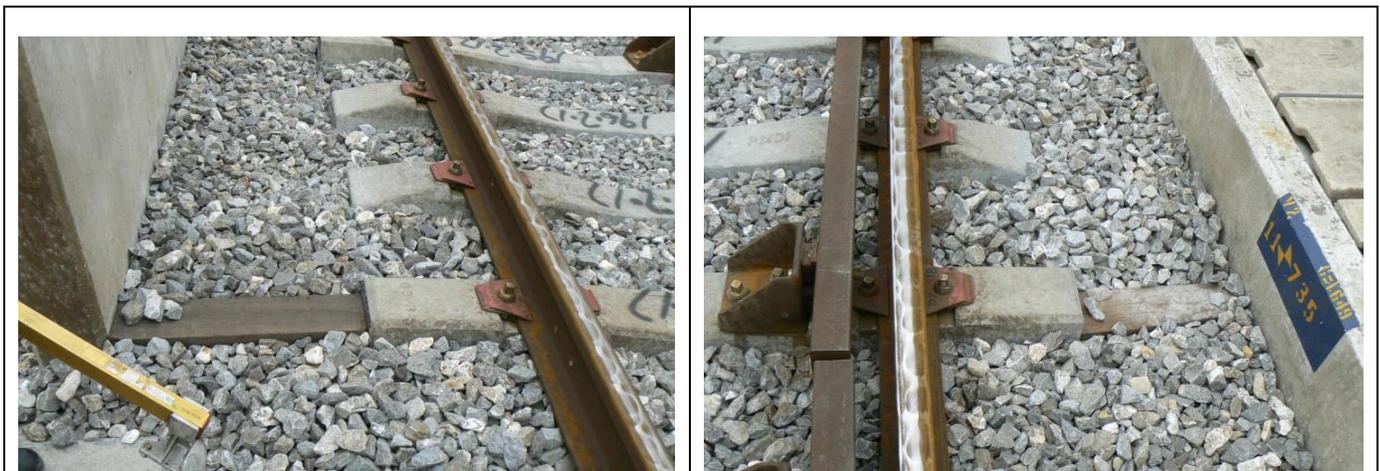


Foto 56. Piezas de madera para sostener la vía en posición, PK 11,735

El reemplazo de numerosos durmientes ha contribuido a la destrucción de la nivelación longitudinal y transversal de la geometría de la vía (no se ha encontrado ningún procedimiento para tratar este problema). La situación es semejante en el caso del reemplazamiento de los rieles.

Estos defectos de nivelación han sido asimismo constatados por ILF-TÜV.



6.1.2 Críticas y medidas correctivas

Los documentos proporcionados no son suficientes para asegurar el mantenimiento duradero de las instalaciones.

El manual de mantenimiento debe volver a redactarse para definir un plan de mantenimiento adaptado a la línea 12

6.2 Mantenimiento del Material Rodante

6.2.1 Evoluciones de los perfiles de las ruedas.

La evolución del perfil de las ruedas se sigue a partir de varios parámetros

- El ancho de los pestana (S_d)
- El altura de los pestana (S_h)
- El Q_r (que representa la zona redondeada del pie de la pestaña)

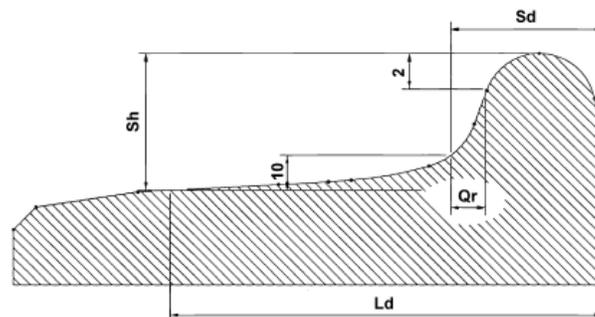


Figura 29. Representación del ancho de la pestaña y del Q_r .

Los diagramas siguientes presente la evolución del ancho de las pestanas y del Q_r en la que sus evoluciones reflejan los desgastes de las ruedas:

Unidad: UT07

Fecha Inicio: 2012-02-01 07:00:00

Fecha Fin: 2014-02-20 06:59:59

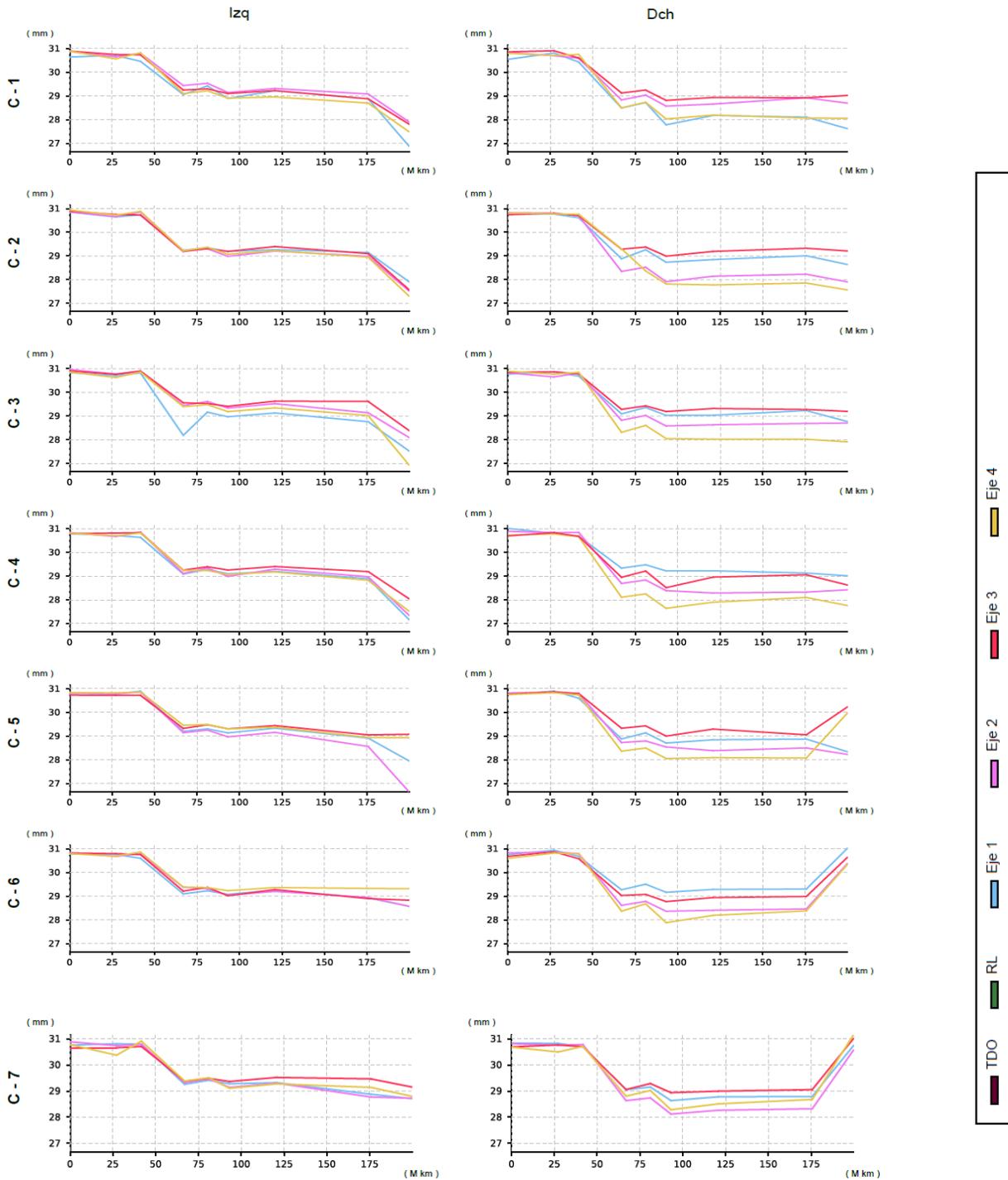


Figura 30. Evolución en Km del ancho de pestana: Unidad 7

Unidad: UT07

Fecha Inicio: 2012-07-31 07:00:00

Fecha Fin: 2014-03-20 06:59:59

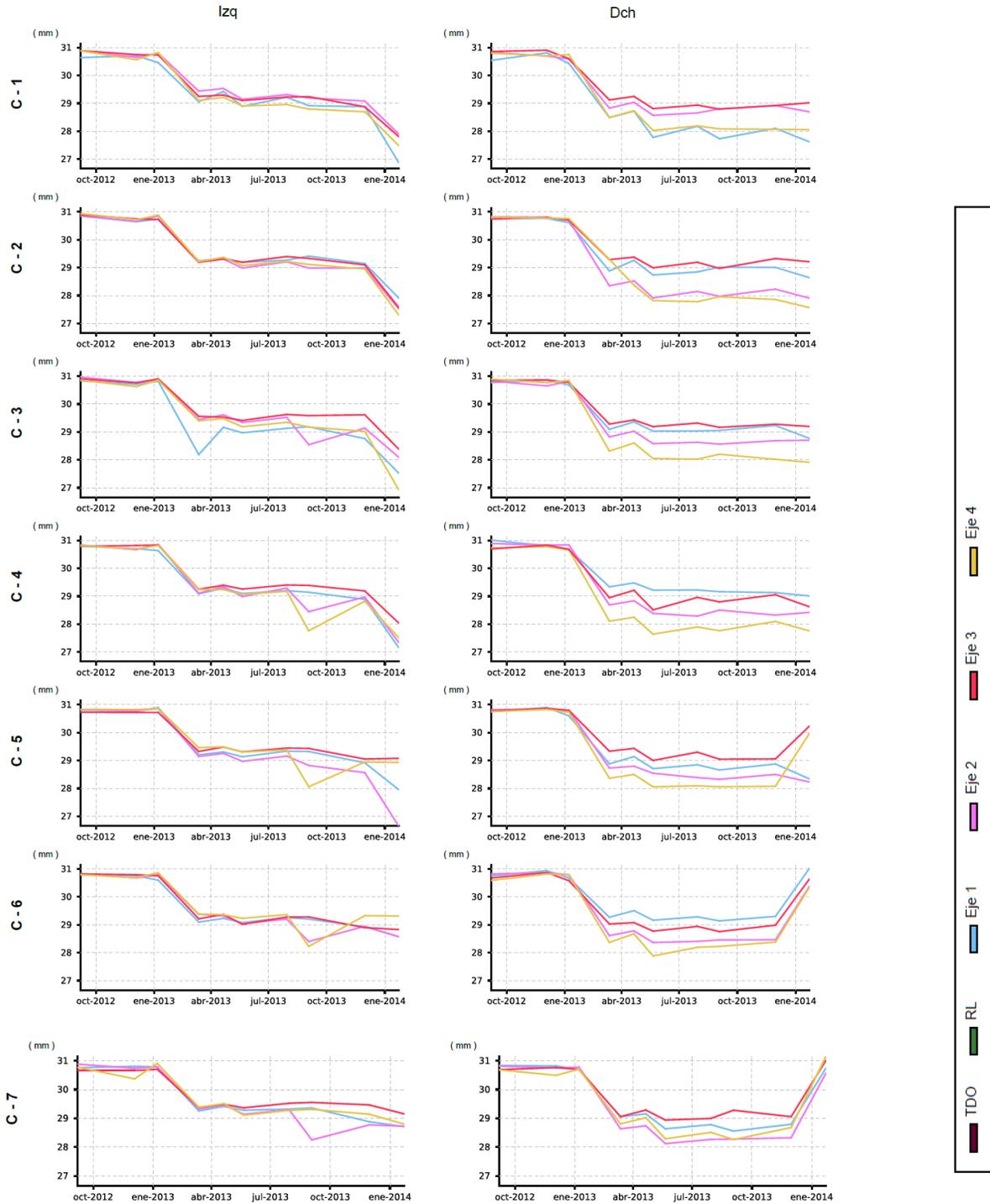


Figura 31. Evolución por fecha del ancho de pestaña: Unidad 7

Unidad: UT07

Fecha Inicio: 2012-09-06 07:00:00

Fecha Fin: 2013-12-02 06:59:59

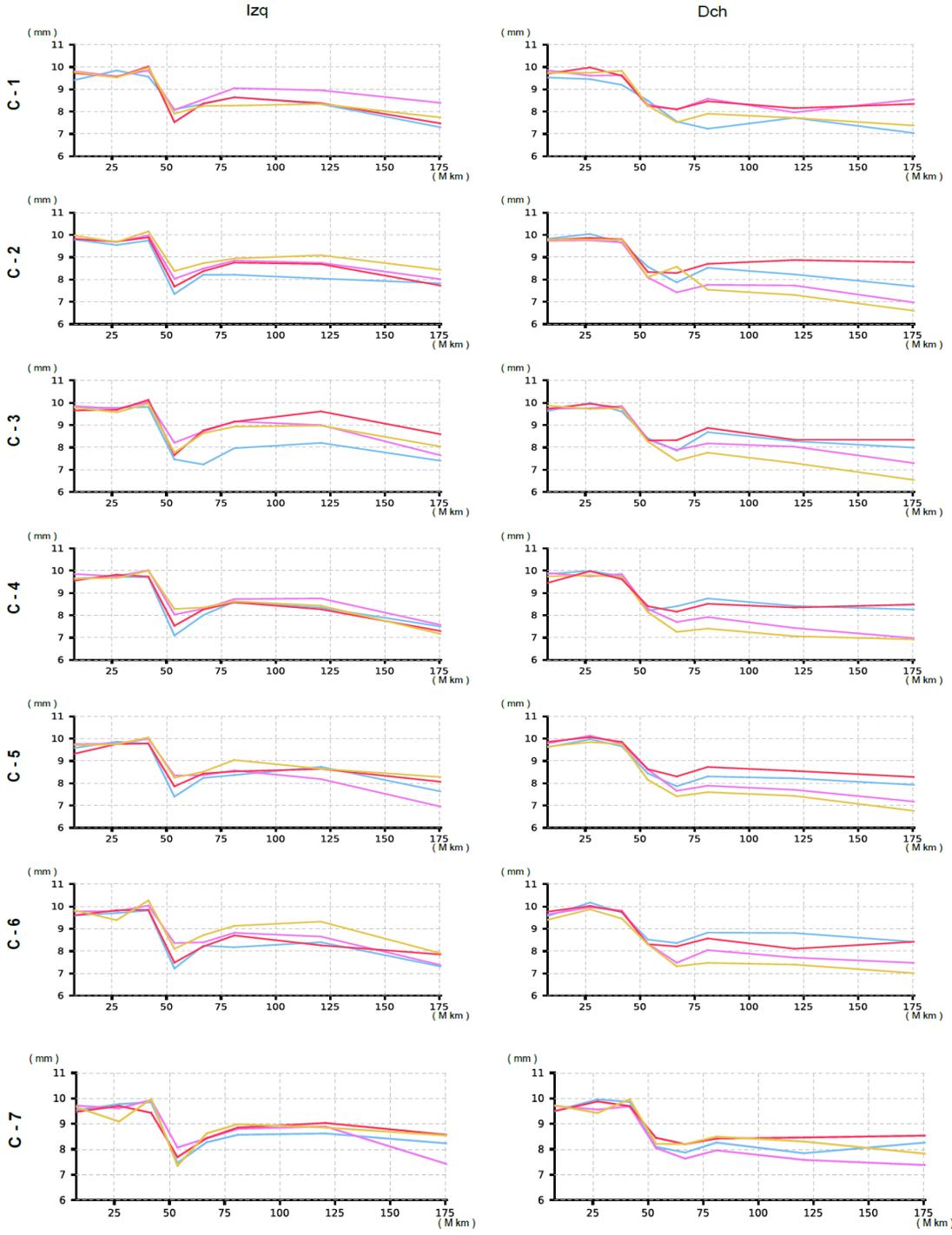


Figura 32. Evolución por Km del Qr: Unidad 7

Unidad: UT07

Fecha Inicio: 2012-09-06 07:00:00

Fecha Fin: 2013-12-03 06:59:59

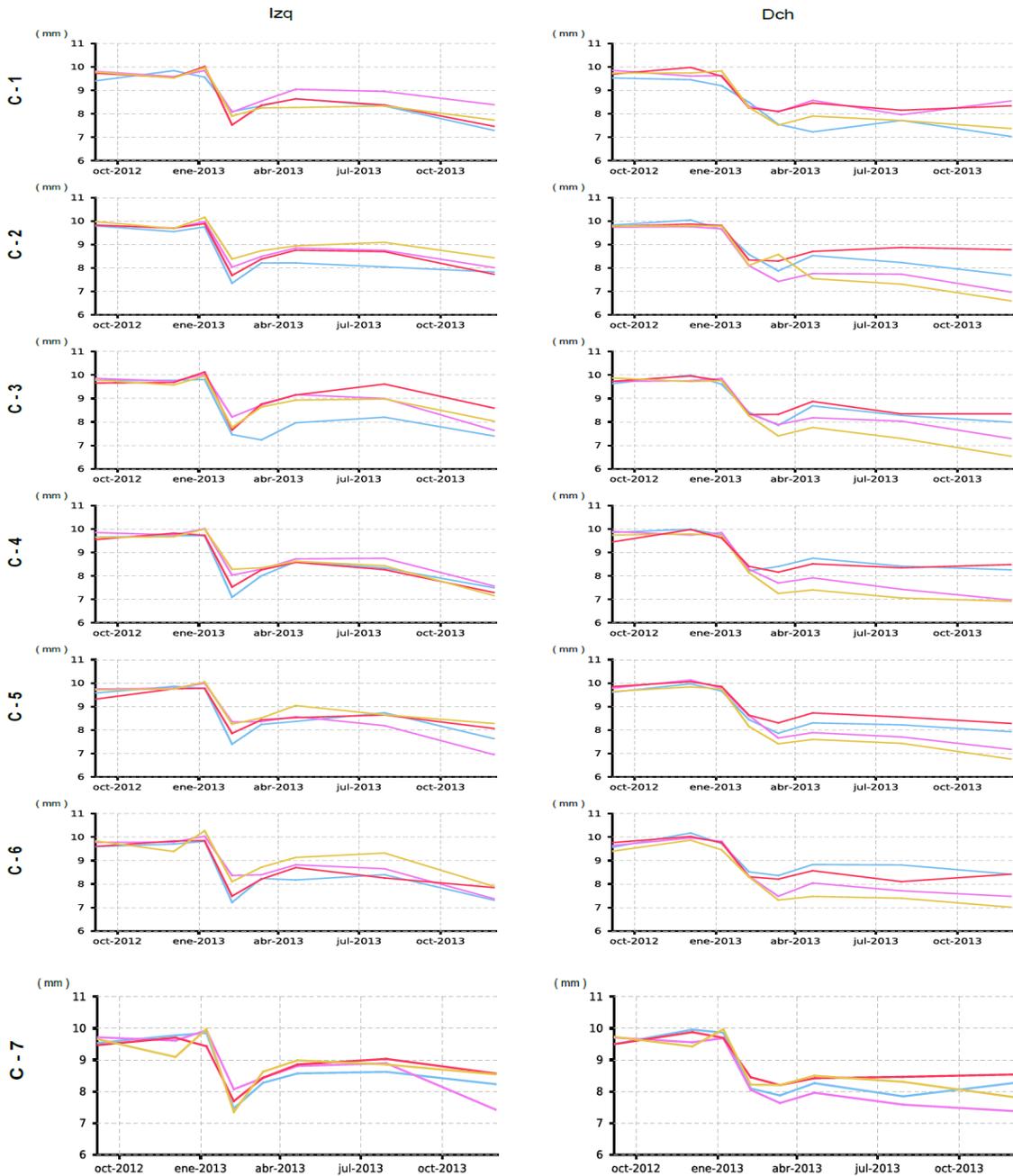


Figura 33. Evolución por fecha del Qr: Unidad 7

Sea cual sea el parámetro observado, se puede deducir el comportamiento global siguiente:

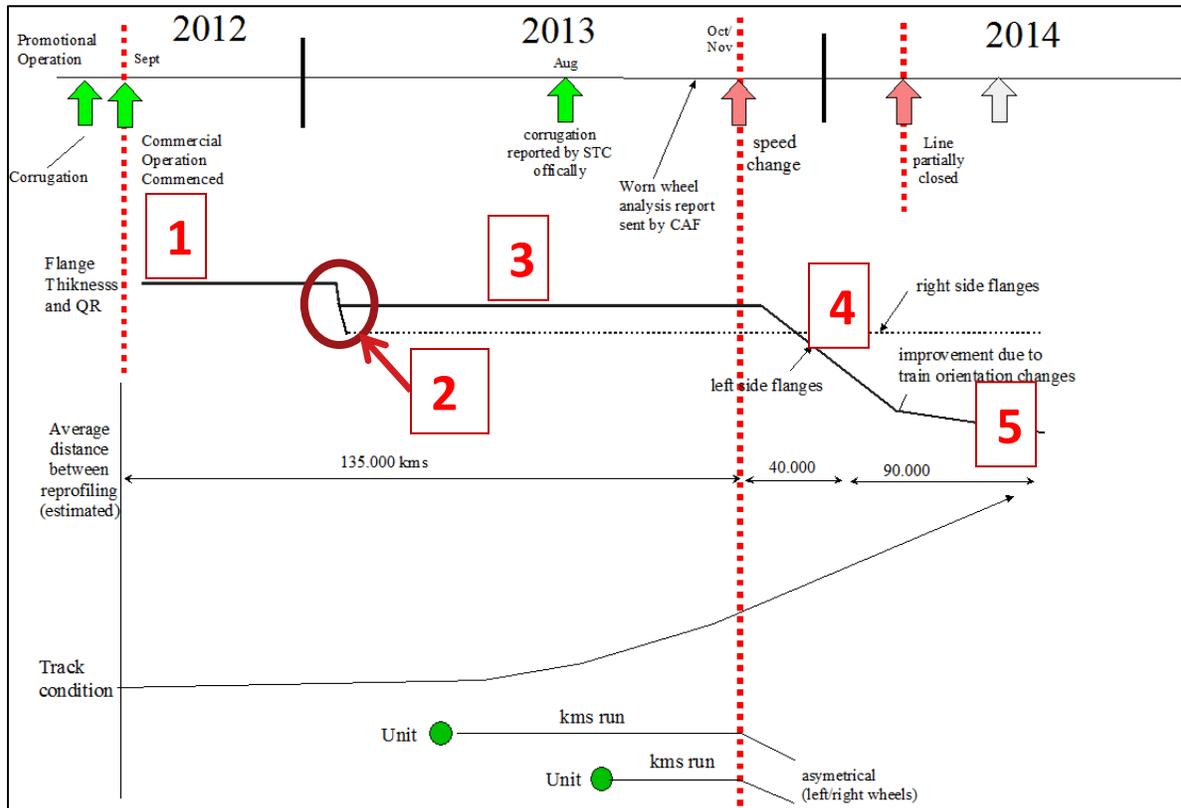


Figura 34. Histórico de la problemática en los ejes

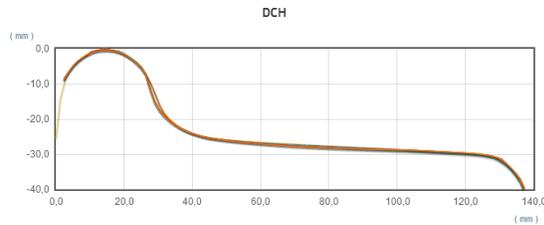
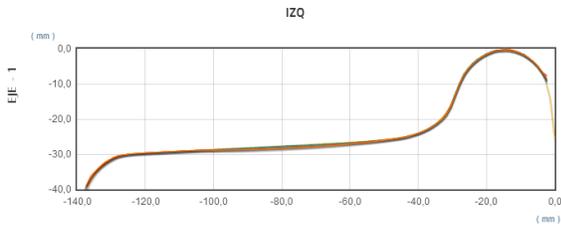
Se pueden distinguir 5 tipos de comportamiento de desgaste al nivel de las ruedas :

| TIPO DE COMPORTAMIENTO | CONDICIONES DE OPERACION | COMENTARIOS |
|------------------------|---|---------------------------------------|
| 1 | VELICADES INICIALES CON LUBRICACION | DESGASTE NORMAL DE LAS RUEDAS |
| 2 | VELICADES INICIALES SIN LUBRICACION | DESGASTE MAXIMAL DE LAS RUEDAS |
| 3 | VELICADES INICIALES CON LUBRICACION | DESGASTE NORMAL DE LAS RUEDAS |
| 4 | VELICADES REDUCIDAS CON LUBRICACION | DESGASTE ANORMAL DE LAS RUEDAS |
| 5 | VELICADES REDUCIDAS CON LUBRICACION Y cambio de direcciones | DESGASTE ANORMAL DE LAS RUEDAS |

Estos diferentes tipos de desgaste pueden verse al nivel de los perfiles :

Tipo de comportamiento 1: Velocidades iniciales CON lubricacion

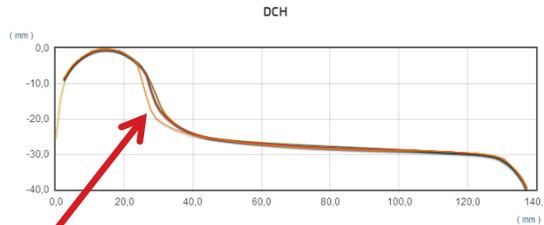
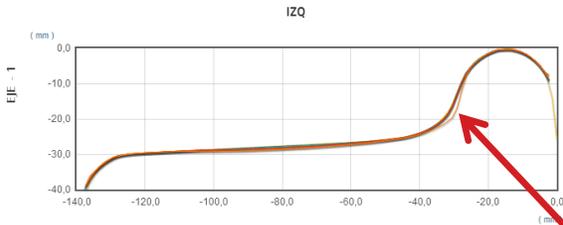
| | | Fecha | Hora | Km | |
|-------------------------------------|--|-------------|----------|--------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 27-ago-2012 | 19:24:46 | - | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 11-oct-2012 | 22:57:47 | 12.220 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 04-dic-2012 | 12:04:12 | 25.700 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 08-dic-2012 | 14:03:17 | 31.456 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 12-ene-2013 | 10:31:45 | 45.485 | |



➔ El desgaste de las ruedas es normal.

Tipo de comportamiento 2: Velocidades iniciales SIN lubricación

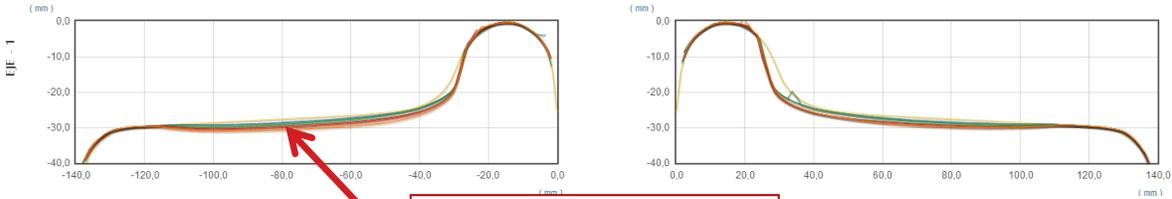
| | | Fecha | Hora | Km | |
|-------------------------------------|--|-------------|----------|--------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 27-ago-2012 | 19:24:46 | - | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 11-oct-2012 | 22:57:47 | 12.220 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 04-dic-2012 | 12:04:12 | 25.700 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 08-dic-2012 | 14:03:17 | 31.456 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 12-ene-2013 | 10:31:45 | 45.485 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 12-feb-2013 | 11:47:47 | 57.619 | |



En naranja el nuevo desgaste anormal.

Tipo de comportamiento 3: Velocidades iniciales CON lubricación

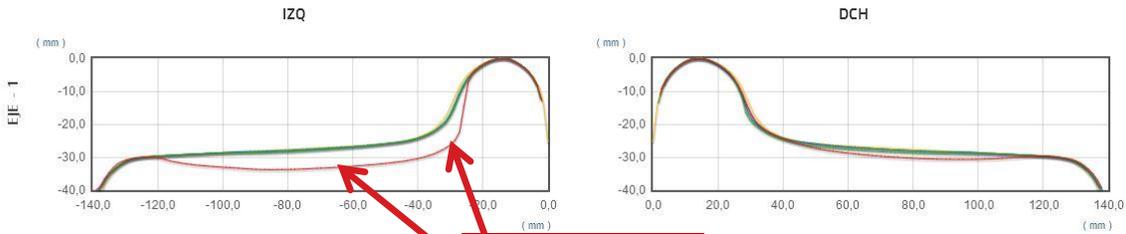
| | | Fecha | Hora | Km | |
|-------------------------------------|--|-------------|----------|---------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 12-feb-2013 | 11:47:47 | 57.619 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 16-mar-2013 | 11:51:03 | 69.673 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 19-abr-2013 | 14:32:46 | 84.396 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 25-may-2013 | 11:57:30 | 100.553 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 29-jun-2013 | 8:07:27 | 114.929 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 03-ago-2013 | 11:22:13 | 128.288 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 09-sep-2013 | 12:30:28 | 142.756 | |



Desgaste normal pero creación de la false pestana.

Tipo de comportamiento 4: Velocidades reducidas CON lubricación

| | | Fecha | Hora | Km | |
|-------------------------------------|--|-------------|----------|---------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 13-sep-2013 | 18:55:32 | 120.767 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 21-oct-2013 | 13:21:24 | 134.086 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 28-nov-2013 | 20:29:18 | 149.640 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | 22-feb-2014 | 4:44:31 | 189.821 | |



Desgaste anormal

Tipo de comportamiento 5: Velocidades reducidas CON lubricación con cambio de direcciones de los trenes

| | | Fecha | Hora | Km | |
|-------------------------------------|---|-------------|----------|---------|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> |  | 31-mar-2014 | 15:55:58 | 192.566 |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> |  | 28-abr-2014 | 12:50:01 | 202.363 |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> |  | 21-may-2014 | 11:04:09 | 211.766 |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> |  | 07-jun-2014 | 19:43:26 | 217.762 |  |



6.2.2 Conclusiones sobre el mantenimiento.

El análisis de la evolución de las ruedas refleja que los diferentes cambios de operación en la vía han modificado las necesidades de mantenimiento de los ejes. La duración entre reperfilados (135.000 km inicialmente) han sido reducidos a tan solo 40.000 km. Aunque se hayan utilizado perfiles de tipo llamado económico (ver apartado 4.3.5), CAF se ha visto obligada a reforzar su sistema de mantenimiento mucho antes de lo previsto en su programación original.

7. ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES Y DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS

7.1 Vibraciones de los ejes

7.1.1 Análisis de las simulaciones

Las simulaciones modales realizadas al nivel de los ejes (ver Informe TSO: EP-2014-118-Rev2) han dado los resultados siguientes:

Los 5 primeros modos vibratorios, entre 8 y 21 hz aproximadamente, corresponden a los modos de suspensión del eje comportándose como un cuerpo rígido sobre la rigidez de la suspensión primaria.

Los modos a 34-36 hz y luego de 264 y 310 hz son modos de basculado de las cajas de los ejes, sobre la rigidez de las suspensiones primarias en los dos primeros modos y sobre la rigidez de los muelles de las cajas de los ejes en los 4 últimos. Estos modos no tienen efecto en el inicio del desgaste ondulatorio

El modo de torsión del eje con las dos ruedas girando en oposición de fase se calcula en 88hz.

La primera flexión del eje con las ruedas girando en oposición de fase se calcula en 94 hz según la dirección z y en 97 hz según la dirección x

La segunda flexión del eje con las ruedas vibrando en fase aparece a 188 hz, según la dirección x y a 189 hz según la dirección z.

La tercera flexión del eje con las ruedas vibrando en oposición de fase aparece a 355 y a 364 hz.

Incidencia de los discos de freno

El considerar los discos conlleva una disminución de las frecuencias propias del orden de 0 a 15%, en función del tipo de ruedas.

El desgaste de las ruedas genera un aumento de las frecuencias propias. Este aumento es importante en el modo de torsión (+30% aprox.) y en los modos de flexión del eje.

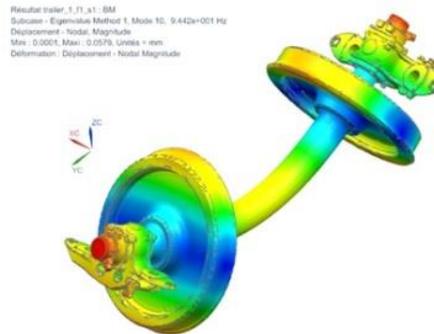


Figura 35. Flexión del Eje

Frecuencia de desgaste ondulatorio :

Como se aprecia en la fotografía, la longitud de onda de los desgastes ondulatorios es del orden de 90 mm. Teniendo en cuenta que en esos puntos la velocidad es de aproximadamente unos 40 km/h, la frecuencia buscada es de aproximadamente **120 hz**.

Conclusión del análisis modal:

El dominio de frecuencia del desgaste ondulatorio es del orden de 120 hz.

Está claro que no puede tratarse del lazo del eje, cuya frecuencias es de 25 hz

Sin embargo, hay varios modos vibratorios del eje compatibles con esta banda de frecuencia. La frecuencia del primer modo de flexión está comprendida entre 94 y 107 hz y podría estar en el origen del fenómeno, aun más teniendo en cuenta numerosos estudios que han mostrado una correlación entre este modo de deformación y el desgaste ondulatorio con fluencia lateral del metal, como ocurre en la Línea 12.

Otros modos vibratorios están también en esta banda de frecuencias, como es la vibración por torsión del eje (88 – 117 hz). Los ensayos deberían concluir si también están en el origen del desgaste ondulatorio, aunque a priori, o esto no corresponde al tipo de defectos encontrados en los rieles, o estos modos, por su tipo de deformaciones, no generan desgaste ondulatorio.

7.1.2 Análisis de los resultados de ensayos

El conjunto de los análisis de este capítulo está basado en el informe de ensayos realizado por TSO y SYSTRA (informe SYSTRA-TSO Ref : EP-2014-175).

La frecuencia de flexión (94,4hz) no es exactamente igual a la medida en los ensayos ya que dos fenómenos pueden aparecer para explicar esta frecuencia superior :

- En la práctica, el efecto de la **impedancia mecánica** del riel en el contacto, tanto en la dirección vertical como en la dirección lateral “desplaza” la frecuencia de flexión vertical del eje calculada en condiciones sin contacto con el riel
- El efecto de **rotación del eje**. La flexión del eje es excitada en el sistema de rotación del eje, mientras las aceleraciones son medidas en el sistema no-rotador de la caja del eje

→ En otras palabras, los ensayos buscan principalmente el orden magnitud de la vibración y la prueba del origen de esta deformación modal

El análisis de los resultados de ensayos busca una correlación entre las frecuencias de los fenómenos vibratorios y la velocidad del tren. En efecto, si dicha correlación apareciera, esto conllevaría la ausencia de una vibración modal del eje.

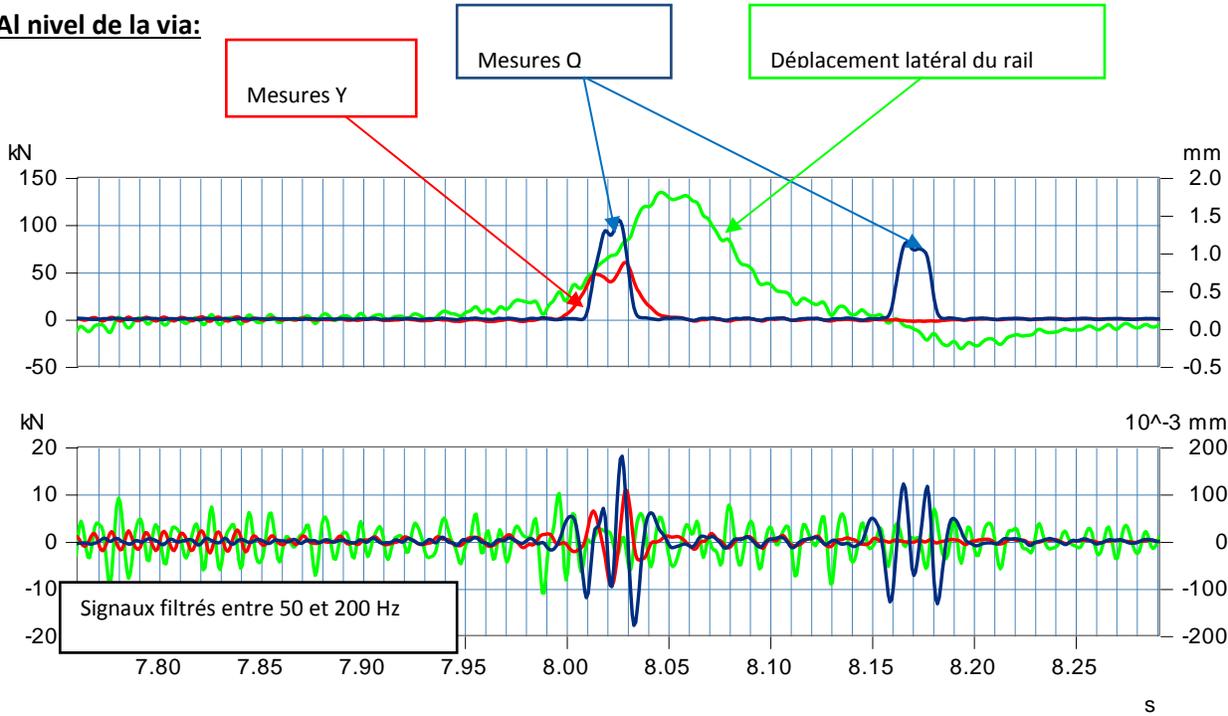
Los análisis vibratorios se realizan mediante:

- Mediciones al nivel del riel:
 - Fuerza Vertical «Q»
 - Fuerza lateral «Y»
 - Desplazamiento lateral del riel «D-rail»
- Mediciones al nivel de las rueda :
 - Desplazamiento lateral de la rueda
- En plena curva y en aparato de vía.

Los ensayos son realizados en las configuraciones siguientes :

| CIRCULACION | VELOCIDADE | RADIO DE CURVA | INSUFFISANCIA DE PERALTE |
|---------------------|------------|----------------|--------------------------|
| M66 (pleine courbe) | 60 Km/h | 200m | 51mm |

Al nivel de la via:



Al nivel de la rueda:

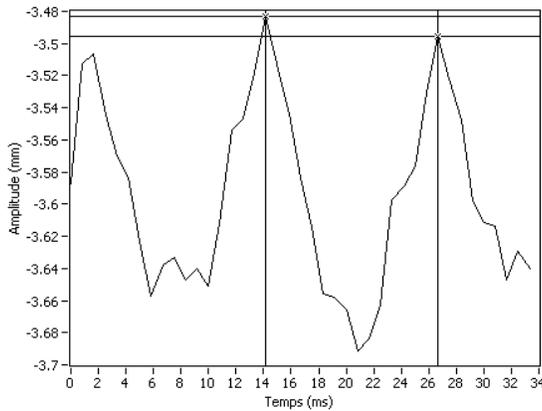
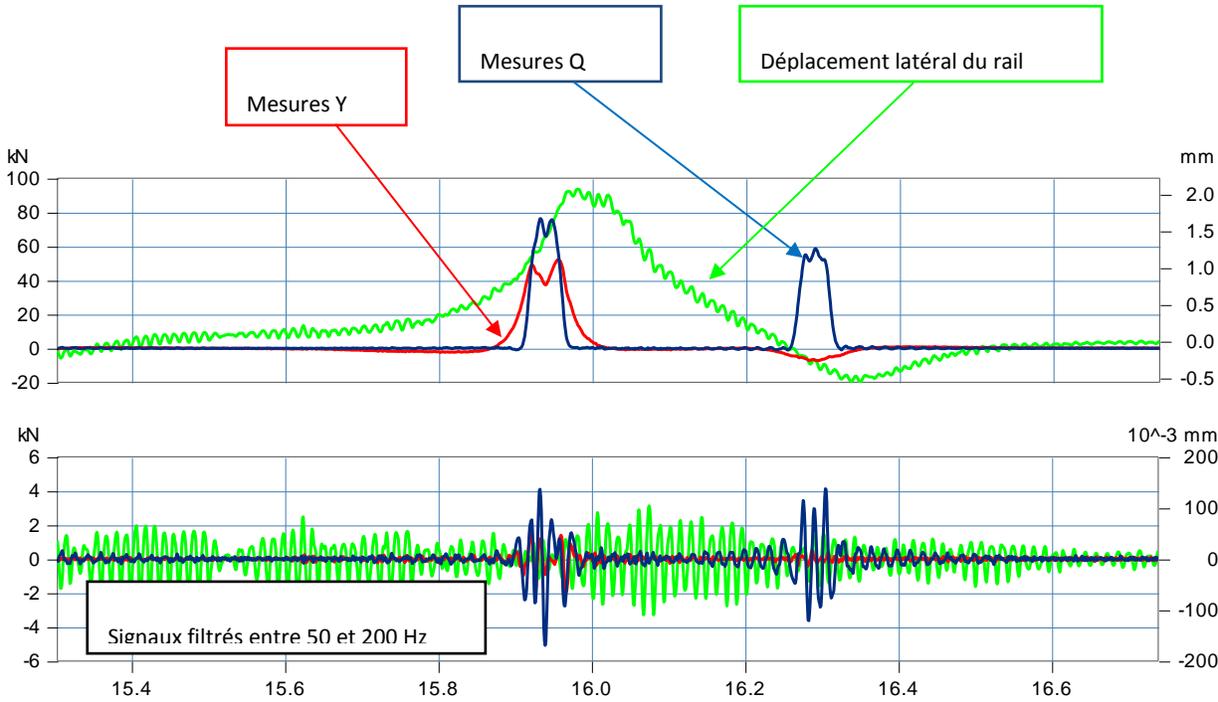


Figura 36. Primer eje – rueda derecha

| CIRCULACION | VELOCIDADE | RADIO DE CURVA | INSUFFISANCIA DE PERALTE |
|---------------------|------------|----------------|--------------------------|
| M54 (pleine courbe) | 25 Km/h | 200m | -124mm |



Al nivel de la rueda:

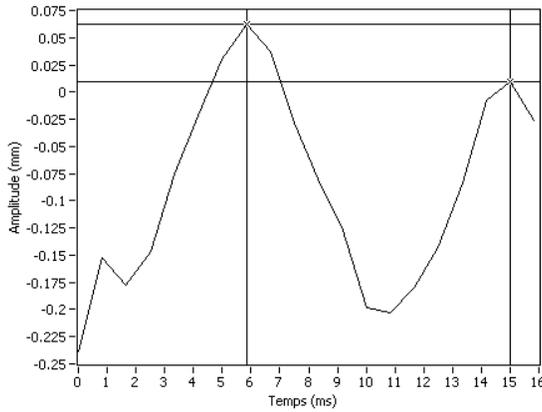


Figura 37. Primer eje – rueda derecha

| CIRCULACION | FREQUENCE SUR LES EFFORTS Y ET Q | FREQUENCE SUR LE DEPLACEMENT RAIL |
|-------------|--|---|
| M66 (V60) | 83 Hz | 85 Hz |
| M54 (V25) | 78 Hz | 80 Hz |
| | | |
| | FREQUENCE SUR LES TOILES DE ROUE ESSIEU D'ATTAQUE | FREQUENCE SUR LES TOILES DE ROUE ESSIEU MENÉ |
| M66 (V60) | Roue G : 120 Hz Roue D : 150 Hz | Roue G : 109 Hz Roue D : / |
| M54 (V25) | Roue G : 75 Hz Roue D : 80 Hz | Roue G : 150 Hz Roue D : 130 Hz |

Los resultados de ensayos en plena curva muestran un fenómeno vibratorio intrínseco al sistema riel/rueda, independientemente de la velocidad.

De manera idéntica a lo observado en curvas de línea, las mediciones realizadas al nivel del riel en los cruces de vía desviada en los aparatos de vía V2/V1 de Zapotitlan han sido analizadas y muestran el mismo fenómeno vibratorio intrínseco al sistema rueda/riel, situado alrededor de 80 hz, a pesar de las demás diferencias de entorno (peralte, velocidad...).

➔ Los ensayos confirman una vibración modal del eje en flexión del orden de 80 hz

7.2 Estudio de nuevas configuraciones perfiles/peraltes/suspensiones

7.2.1 Simulaciones

7.2.1.1 Hipótesis

Nuevas interfaces riel/rueda simuladas, por un lado, con los peraltes de origen y, por otro lado, con los peraltes recomendados por SYSTRA. Estas simulaciones han sido realizadas por la SNCF con el software

VAMPIRE, y están basadas en los archivos suministrados por CAF (FR-tare_static.veh y FR-tare_dynamic.veh).

Estos modelos consideran las características de un vehículo de cabeza FE10.

Hipótesis de las simulaciones:

- Curva de radio 200m
- Peralte de 160mm
- Velocidad: 60km/h

| ESCENARIO | PERFIL DEL RIEL | PERFIL DE RUEDA |
|-----------|-----------------|---|
| 1 | RE 115 | CAF 126 |
| 2 | RE 115 | NF-F-03-402 |
| 3 | RE 115 | NF-F-03-402 modificado para obtener una conicidad equivalente al escenario 4 (Abandonada) |
| 4 | RE 115 | Perfil SNCF (S1002) |
| 6 | UIC 60 | CAF 126 |
| 7 | UIC 60 | NF-F-03-402 |
| 8 | UIC 60 | Perfil SNCF (S1002) |

Tabla 19. Combinaciones riel/rueda a simular informáticamente

Tabla 20.

7.2.1.2 Análisis de los resultados de simulaciones

7.2.1.2.1 Análisis de la influencia de los perfiles y de los peraltes en el paso de curvas de 200m

| ESCENARIO | CONFIG. L12 | CONFIG. SNCF | CONFIG. RATP | COMENTARIOS |
|--|--|--------------|--------------|---|
| Parámetros de vía y contacto rueda/riel | | | | |
| Trazado | Curvas y contra-curvas de radios 200m sin elementos rectos de transición | | | Esta configuración no corresponde a los usos de la SNCF y de la RATP porque estas dos redes procuran evitar radios menores que 300m. |
| Peraltes | 160 mm | 50 mm | 50 mm | 50mm corresponde a la parte baja del rango de los valores de los peraltes en curvas de 200 m. Ha sido escogida para aumentar los contrastes entre los cálculos. |
| Perfil de los rieles | RE 115 | UIC 60 | UIC 60 | |
| Parámetros de los trenes | | | | |
| Perfil de las ruedas | CAF X.06.00126 | S 1002 | NF-F-03-402 | |
| Suspensión primaria Kx et Ky | 5,94 kN/mm | | | Los parámetros de los bogies en las tres configuraciones son idénticos porque a este estadio de las simulaciones quisimos hacer aparecer la influencia de los perfiles y de los peraltes en el paso de curvas de 200m, con todos los demás elementos iguales. |
| Suspensión secundare Ky | 0,19 kN/mm | | | |
| Distancia entre eje de los bogies | 2,5 m | | | |

| | PARAMÉTROS | CONFIG. SNCF | CONFIG. L12 | L12 % | | CONFIG. RATP | CONFIG. L12 | L12 % | | CONFIG. RATP | SNCF | SNCF % |
|----|---|--------------|-------------|---------|--|----------------|-------------|----------------|--|----------------|------|----------------|
| | Esfuerzos de inscripción del eje en la vía | | | | | | | | | | | |
| 1 | Esfuerza lateral de la rueda de guía (kN) | 42,7 | 40 | -6,32% | | 40,7 | 40 | -1,72% | | 40,7 | 42,7 | 4,91% |
| 2 | Fuerza lateral global del eje de guía sobre de la vía (kN) | 24,3 | 14,3 | -41,15% | | 23 | 14,3 | -37,83% | | 23 | 24,3 | 5,65% |
| 3 | Coefficiente de descarrilamiento Y/Q | 0,4 | 0,45 | 12,50% | | 0,38 | 0,45 | 18,42% | | 0,38 | 0,4 | 5,26% |
| | Parámetros de posición del eje | | | | | | | | | | | |
| 4 | Desplazamiento lateral del eje en la vía (mm) | 7,9 | 7,3 | -7,59% | | 8,3 | 7,3 | -12,05% | | 8,3 | 7,9 | -4,82% |
| 5 | Ángulo de ataque del eje de guía (mrad) | 7,8 | 8 | 2,56% | | 7,2 | 8 | 11,11% | | 7,2 | 7,8 | 8,33% |
| | Parámetros de rozamientos | | | | | | | | | | | |
| 6 | Fuerza de frotamiento lateral (Y) de la rueda interior (kN) | 18,1 | 24,5 | 35,36% | | 15,7 | 24,5 | 56,05% | | 15,7 | 18,1 | 15,29% |
| 7 | Fuerza de frotamiento combinada (X + Y) de la rueda interior (kN) | 25,3 | 31,9 | 26,09% | | 26,7 | 31,9 | 19,48% | | 26,7 | 25,3 | -5,24% |
| 8 | Fuerza de frotamiento al nivel de la pestaña (kN) | 26,9 | 34,5 | 28,25% | | Pas calculable | 34,5 | Pas calculable | | Pas calculable | 26,9 | Pas calculable |
| | Coefficientes de desgaste | | | | | | | | | | | |
| 9 | Coefficiente de desgaste (*) al nivel de la mesa de rodadura | 223 | 277 | 24,22% | | 245 | 277 | 13,06% | | 245 | 223 | -8,98% |
| 10 | Coefficiente de desgaste (*) al nivel de la pestana | 613 | 595 | -2,94% | | Pas calculable | 595 | Pas calculable | | Pas calculable | 613 | Pas calculable |

| PARAMÉTROS | | COMMENTARIOS |
|---|---|---|
| Esfuerzos de inscripción del eje en la vía | | |
| 1 | Esfuerzo lateral de la rueda de guía (kN) | Teniendo en cuenta de los peraltes mucho más importante, hay menos fuerza centrífuga y pues de fuerza lateral (-37,83 % con el perfil RATP). |
| 2 | Fuerza lateral global del eje de guía sobre de la vía (kN) | A tener en cuenta de todos modos: - Que una fuerza lateral eje/vía importante no es un problema en sí (23 kN). - Qué la fuerza sobre la rueda de guía disminuya poco (-6 %), lo que muestra que los peraltes menor es globalmente positivo. |
| 3 | Coefficiente de descarrilamiento Y/Q | El coeficiente Y/Q aumenta notablemente. Es todavía más el caso en las conexiones. Sobre este aspecto, los fuertes peraltes de la línea 12 son desfavorables. |
| Parámetros de posición del eje | | |
| 4 | Desplazamiento lateral del eje en la vía (mm) | En la configuración L12, el vehículo es menos rechazado lanzado hacia el exterior de la curva (insuficiencia de peralte menor) y por lo tanto se produce un desplazamiento lateral del eje más menor. La configuración RATP aporta una ganancia de 12 y 11 %. Con valores más grandes, el comportamiento de la configuración L12 es globalmente nefasto al paso de las curvas generando un ángulo más grande de ataque. |
| 5 | Ángulo de ataque del eje que lleva (mrad) | |
| Parámetros de rozamientos | | |
| 6 | Fuerza de rozamiento lateral (Y) de la rueda interior (kN) | Estos tres criterios, que son importantes desde el punto de vista de la energía disipada en la mesa de rodadura (y son por lo tanto susceptibles de generar un desgaste ondulatorio), son reducidos de 60% y 20% con el perfil RATP, por la simple modificación de los perfiles y de los peraltes; |
| 7 | Fuerza de frotamiento combinada (X + Y) de la rueda interior (kN) | |
| 8 | Fuerza de frotamiento al nivel de la pestaña (kN) | |
| Coefficientes de desgaste | | |
| 9 | Coefficiente de desgaste (*) al nivel de la mesa de rodadura | El coeficiente de desgaste es casi no cambiado al nivel de la pestaña, sin embargo el desgaste de la tabla de rodadura es fuertemente reducidos (+24 % con el perfil SNCF y 13% con el perfil RATP), ahora es ésta que genera el desgaste ondulatorio. |
| 10 | Coefficiente de desgaste (*) al nivel de la pestaña | |

7.2.1.2.2 Análisis de la influencia de las suspensiones primeras en el paso de curvas de 200 m

Con el fin de estudiar el impacto de las suspensiones primarias sobre las energías disipadas en la vía, las simulaciones que hacen variar las rigideces de estas han sido realizadas. Con todos los demás elementos iguales, una modificación de las suspensiones primarias (modificación de K_x 6kN/mm a 3kN/mm) trae a una reducción del 50 % de las energías disipadas en la vía.

7.2.1.2.3 Análisis de la influencia de la distancia entre eje de los bogíes de curvas de 200 m

Con el fin de estudiar el impacto de distancia entre eje de los bogíes sobre las energías disipadas en la vía, las simulaciones que hacen variar la distancia entre ejes de los bogíes han sido realizadas. Con todos los demás elementos iguales, una modificación esta distancia (modificación de 2500mm a 2200mm) trae a una reducción del 15 % de las energías disipadas en la vía.

7.2.2 Ensayos

El conjunto de los análisis de este capítulo está basado en el norme de ensayos realizados por SYSTRA y TSO (ver informe SYSTRA-TSO Ref : EP-2014-175).

7.2.2.1 Análisis del comportamiento del FE10 (configuración originale)

7.2.2.1.1 Hipótesis de la Auditoría

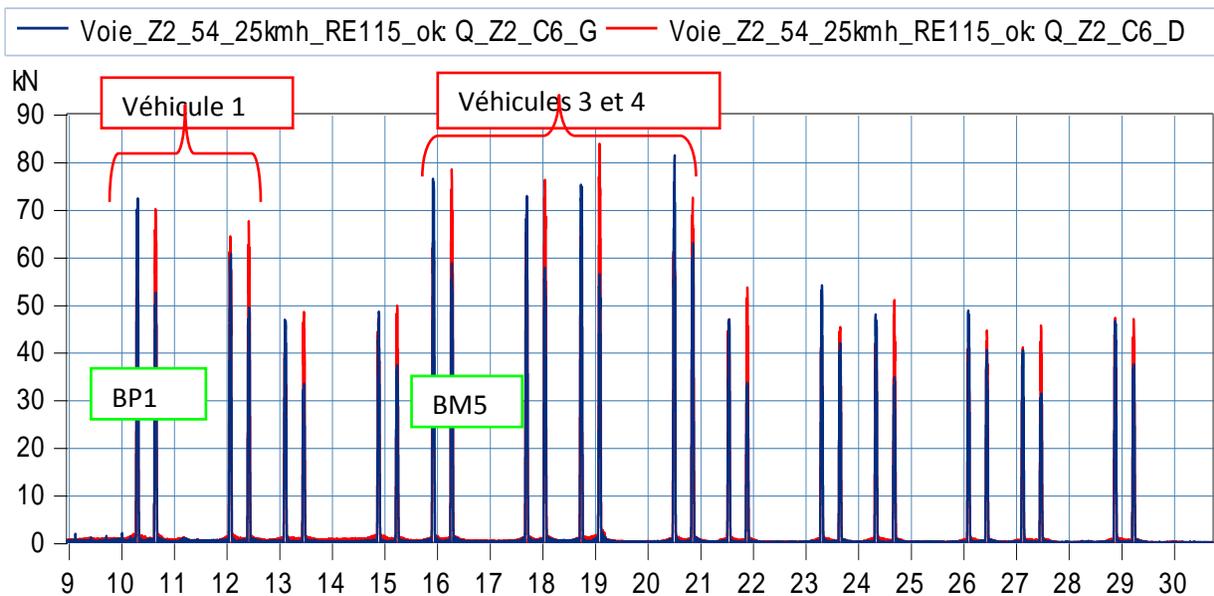
La auditoría, basada en el diseño de la vía, había concluido que entre los factores principales de los problemas al nivel de la rueda y el riel, se encuentra;

- La inadecuación entre el radio de curvatura demasiado reducido y la distancia entre ejes de bogíes
- La combinación perfil de rueda / perfil de riel que no obtiene el cono equivalente suficiente para un cruce cuasi-estático estable de las curvas de 200m de radio
- El peralte demasiado elevado teniendo en cuenta el radio y la velocidad de los trenes (agravado por las reducciones de velocidad posteriores) conduce a una falta de suficiencia de peralte necesaria para estabilizar el bogí y los ejes de la fila alta sobre la parte de mayor radio de la rueda
- Una falta de lubricación que podría haber atenuado las consecuencias de los fallos anteriores

7.2.2.1.2 Cinemática del bogí en curva (situación nominal)

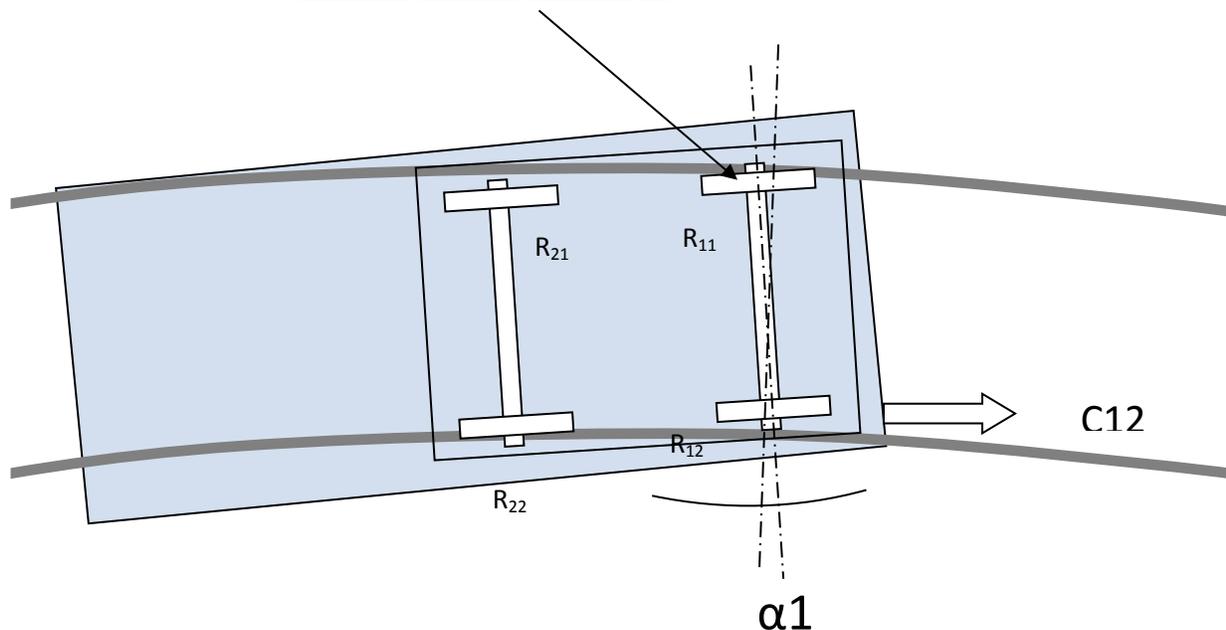
En un primer momento, el análisis se realizará sobre el comportamiento del bogí no motor cargado. El comportamiento de los bogíes no cargados no es significativo.

Solo los coches 1, 3 y 4 estaban cargados para los ensayos, como lo muestran las mediciones de fuerzas verticales Q al paso del tren;



Se constata además que las cargas verticales más importantes se sitúan sobre el riel inferior (riel derecho, curva roja) debido al exceso de peralte (25 km/h), pero éstas no son visibles más que al nivel de los ejes dirigidos de cada bogí, disimetría sintomática de una mala inscripción en curva.

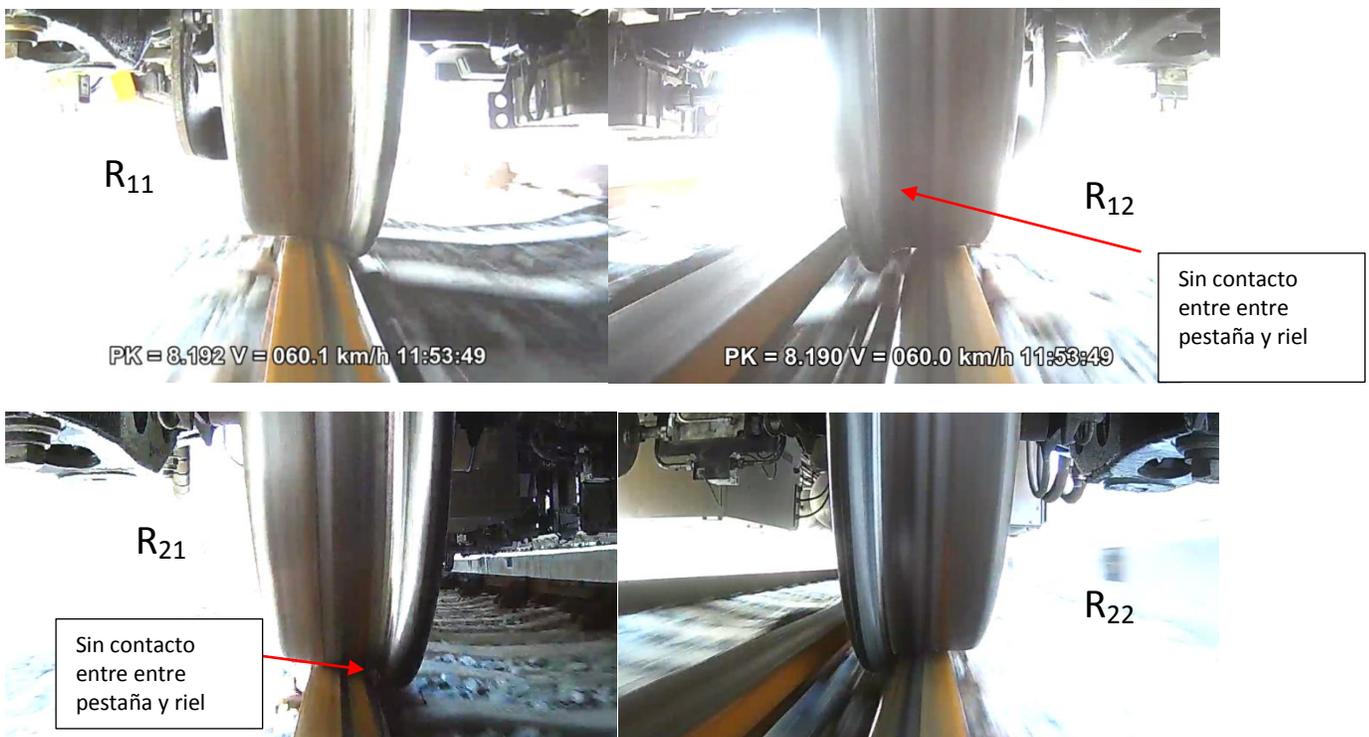
El análisis del comportamiento cinemático en curva debe **centrarse en la posición del eje dirigido**. En efecto, incluso cuando la inscripción en curva es mala (por ejemplo cuando el bogí sub-vira como en el esquema más abajo), la rueda de guía del eje de ataque se apoya en el riel exterior



La circulación testada para este análisis de este aspecto cinemático es la circulación 66, que es la de referencia (RE115 con lubricación).

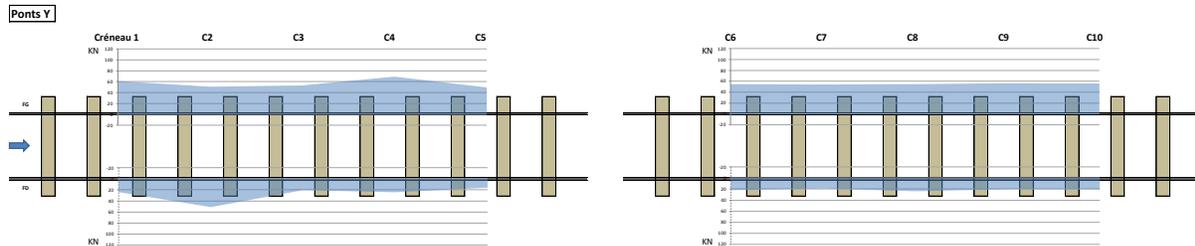
| Marcha | Velocidad | Radio | Insuficiencia |
|--------|-----------|-------|---------------|
| M66 | 60 km/h | 200 m | 51 mm |

Las grabaciones de video del cruce de la curva 12 (ver más abajo) muestran este comportamiento subvirador del bogí de ataque. Por un lado, el eje 1 (ruedas 11 y 12) está totalmente apoyada sobre el riel exterior de la curva, y por otro, el eje 2 está inversamente posicionado en la vía.

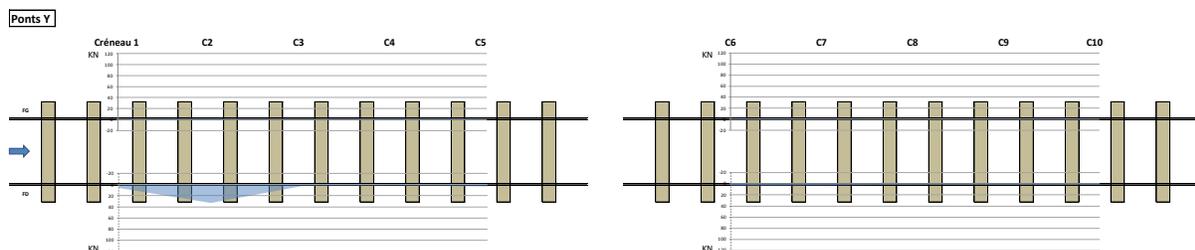


Este comportamiento es visible igualmente al estudiar las fuerzas Y entre ruedas y rieles y la posición del ángulo de los ejes.

Eje 1 – BP1 – M66



Eje 2 – BP1 – M66



Los esfuerzos laterales Y (considerados positivos cuando las fuerzas del eje hacia el riel se dirigen hacia el exterior del riel) son casi nulos en el eje dirigido (eje 2). Por lo tanto, son muy fuertes para el eje de cabeza que soporta todos los esfuerzos de guiado, medidos de forma casi constante en 60 kN.

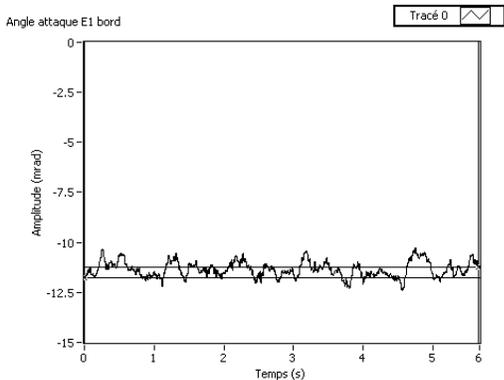
Además, el alto ángulo de ataque del eje delantero genera unos esfuerzos laterales igualmente importantes en el riel bajo. Este comportamiento ha sido confirmado por las mediciones de basculado del riel que son muy elevadas.

Mecánicamente, este comportamiento en curva genera en la vía desgaste (ondulatorio o lateral), aplastamiento o fluencia en la fila baja y al final roturas y movimientos laterales de las fijaciones y, al nivel de las ruedas, desgaste de la pestaña y/o de la tabla de rodadura de las ruedas.

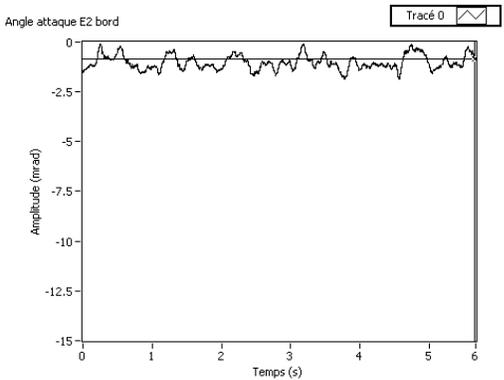
La cinemática descrita anteriormente se confirma por las mediciones de los ángulos de ataque (en suelo y a bordo).

A continuación se presentan las mediciones en la curva 12 para la circulación de referencia nº 66:

Eje de ataque del bogie dirigido 1 (BP1)



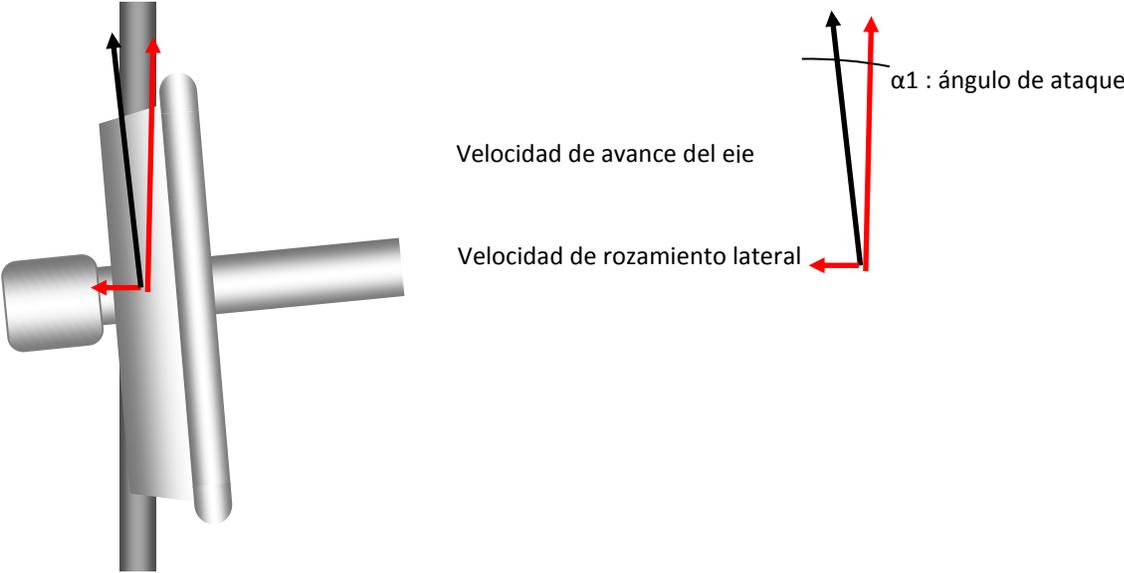
Eje de cola del bogie dirigido 1 (BP1)



El ángulo de ataque del eje de cabeza es del orden de 11,5mrad mientras que el del eje de cola es muy débil, alrededor de 1 mrad (**ángulos entre ejes y vía**).

El ángulo de ataque medido de 11,5 mrad es del orden de 2 a 3 veces superior a los valores habituales.

Un valor tan importante genera continuamente un rozamiento lateral rueda-riel equivalente a:

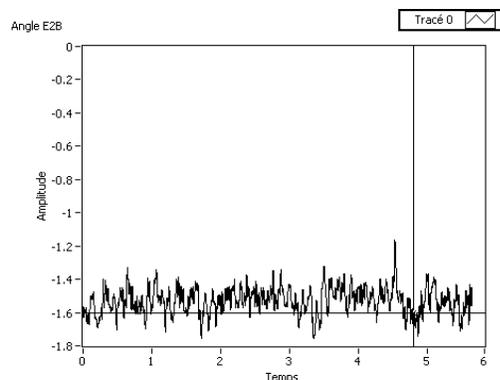
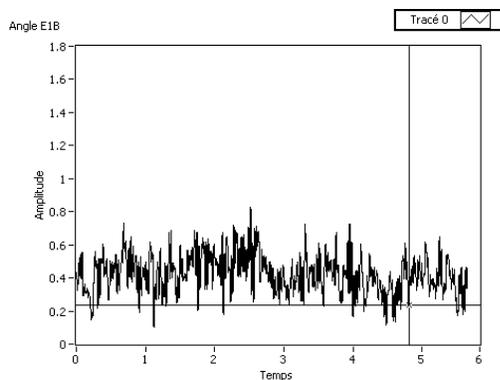


La velocidad de rozamiento lateral es por lo tanto igual a 0.35 m/s. Esto equivale a una potencia disipada media de $0.35 \text{ m/s} \times 0.3 \times 140 \text{ kN}$, alrededor de 15 kW disipados en desgastar las zonas de rodadura de las ruedas y del riel por cada eje.

A ello se suman los rozamientos al nivel de la pestaña, no calculados aquí.

Por otro lado:

- La rotación del bogí con respecto al coche (medida) es del orden de 25 mrad. Se necesitaría una rotación de 31 mrad para obtener una buena axialidad del en la curva
- Las rotaciones de los ejes con respecto al bogí son casi nulas, de 0.3 mrad y 1.2 mrad en el eje de cabeza y el eje de cola respectivamente



En conclusión, el análisis de la rotación de los bogies y de los ejes con respecto al coche y de los ángulos de ataque de los bogies y de los ejes con respecto a la vía confirma que los elementos de rodamiento no se inscriben correctamente en las curvas de radio reducido. En particular, los ejes no se orientan prácticamente en la curva y el ángulo resultante, aumentado por la poca rotación del bogie, genera rozamientos y desgastes muy importantes.

El origen de este fenómeno está en el corazón del estudio paramétrico que debe determinar la proporcionalidad de las causas, a saber:

- La rigidez longitudinal (K_x) demasiado elevada en las suspensiones primarias
- Los perfiles y el contacto rueda/riel que generan insuficiencia de conicidad
- El peralte (o la velocidad) que genera un desplazamiento lateral insuficiente

7.2.3 Dinámica del bogí en curva (situación nominal)

Se ha realizado un primer análisis de la dinámica en curva siguiendo los principios de la ficha UIC 518 (o norma europea EN 14363) de manera incompleta ya que la homologación de los vehículos según dicha

ficha está basada en un tratamiento estadístico que necesitaría realizar más circulaciones de ensayo y de diferentes configuraciones de curvas.

Sin embargo, con el fin de obtener resultados estadísticos, las zonas de plena curva en las curvas C11 y C12 han sido divididas en tramos de 10 m. Para cada tramo, se ha calculado el valor estadístico definido por el percentil a 99.85 en la curva a derechas (C12) ó 0.15 en la curva a izquierdas (C11).

Los resultados presentan, para todas las circulaciones seleccionadas, los percentiles por tramo. El Valor Máximo Estimado (VME) es determinado por la media y 3 veces la desviación estándar de los percentiles tomados en consideración.

Criterios de Seguridad

Para los bogíes 1, 6 y 7, los VME son inferiores a los límites de seguridad para todas las velocidades realizadas, Para la velocidad de 70 km/h, velocidad máxima realizada en esta configuración, los resultados son los siguientes para el bogíes 1:

| BOGIE 1 – Valores Máximos Estimados (VME) | | | |
|---|----------------------|----------------|----------------|
| | Radios muy reducidos | | |
| Parámetro | Valor Límite | Valor Absoluto | % Valor Límite |
| $\ddot{y} * s \text{ I (m/s}^2\text{)}$ | 2.6* | 1.63 | 62.6 % |
| $\ddot{y} +s \text{ 1 (m/s}^2\text{)}$ | 11* | 3.75 | 34 % |
| $\ddot{y} +s \text{ 2 (m/s}^2\text{)}$ | 11* | 1.88 | 17 % |

Circulación 92.1

Nota: Valor aproximada basada en la EN 14363

Del punto de vista de las fuerzas Y y Q, el criterio de descarrilamiento Y/Q es del orden de 0.60 a 0.65. Éste es un valor aceptable, inferior al límite de 0.80 definido en la norma.

Dos comentarios son pertinentes:

- Los valores de 0.65 son un poco demasiado alto, y son consecuencia del alto peralte
- La disminución del peralte y por consecuente el aumento de la insuficiencia de peralte tiene como consecuencia el fuerte aumento de las fuerzas verticales Q y en menor medida el aumento de las fuerzas laterales Y lo cual, al final, conducen a reducir el ratio de Y/Q

En consecuencia, el comportamiento dinámico desde el punto de vista de la seguridad puede ser considerado como adecuado y no presenta ningún aspecto particular.

7.3 Análisis de la influencia de las configuraciones ensayadas sobre el comportamiento en curva

7.3.1 Objetivo de los ensayos y de los parámetros a medir

Además del análisis del comportamiento en curva presentado en el apartado anterior, los ensayos realizados in situ han permitido medir la influencia positiva o negativa de algunos parámetros clave de la dinámica ferroviaria.

Evidentemente, el número de parámetros no es muy importante, ya que ni la vía, ni los componentes ni el material rodante han podido ser modificados.

Sin embargo, los análisis realizados buscan evaluar (complementando las modelizaciones realizadas en fase de auditoría) el impacto de:

- El peralte: indirectamente a través de la velocidad del tren en curva
- El perfil del riel
- La lubricación: por falta de tiempo, la configuración del riel UIC-60 no ha podido ser ensayada

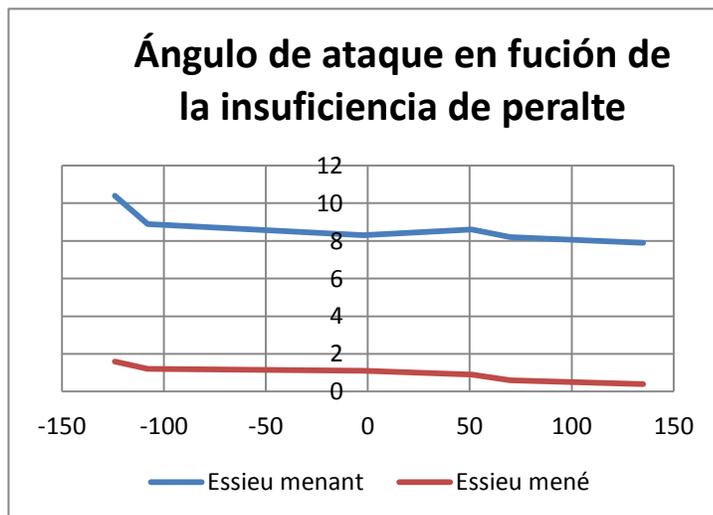
7.3.2 Impacto del perfil sobre el comportamiento en curva

El modificar la velocidad de paso a cada circulación equivale (casi) a modificar el peralte de la curva a velocidad de paso constante.

El análisis siguiente estudia el impacto de esta “variación de peralte” sobre el comportamiento cinemático y dinámico del bogie en la curva C12, en configuración constante: **Riel de perfil RE115 lubricado**

Las velocidades analizadas son:

| Circulación | Velocidad Km/h | Insuficiencia mm | Angulo de ataque eje/vía (mrad) | |
|-------------|-------------------|---------------------|---------------------------------|-------------|
| | | | Eje delantero | Eje trasero |
| M54 | 25 | -124 | 10,4 | 1,6 |
| M56 | 30 | -108 | 8,9 | 1,2 |
| M60 | 52 | -2 | 8,3 | 1,1 |
| M66 | 60 | 51 | 8,6 | 0,9 |
| M88 | 63 | 70 | 8,2 | 0,6 |
| M92 | 71 | 135 | 7,9 | 0,4 |



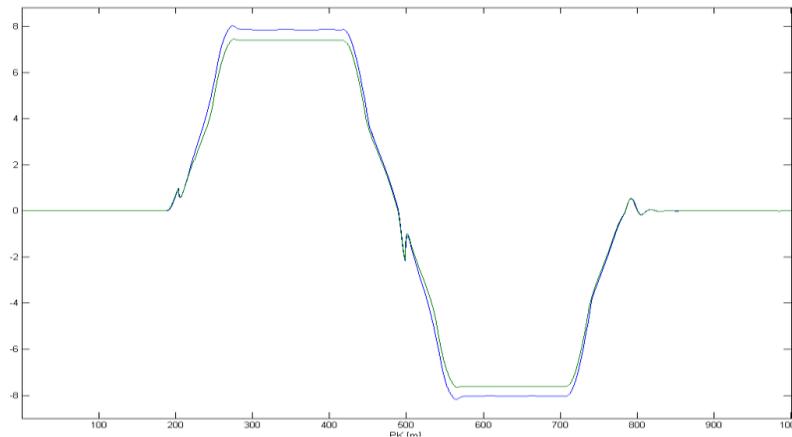
El aumento de la insuficiencia de peralte causa efectivamente una disminución del ángulo de ataque, aunque en pequeña proporción.

La circulación 92 presenta una insuficiencia de 135 mm que es bastante alta, y las fuerzas centrífugas que aparecen deberían haber forzado el bogie a colocarse en su correcta posición en el eje de la curva.

Estos resultados confirman las simulaciones realizadas en julio de 2014 que mostraban una débil reducción del ángulo de ataque a pesar de una disminución del peralte de 160 a 50 mm (o sea la insuficiencia de peralte pasa de 52 mm a 162 mm).

La reducción del ángulo de ataque calculado es de 8 mrad a 7.4 mrad, lo que corresponde más o menos a los valores medidos.

— fichier: 1 simulation_09-Jul-2014_Mexico_CAFW4_d160_d05_AREA_CAF_Emp25_Nom.mat | canal: 66 W1W Déplacement yaw Essieu 1
— fichier: 2 simulation_09-Jul-2014_Mexico_CAFW4_d50_d05_AREA_CAF_Emp25_Nom.mat | canal: 66 W1W Déplacement yaw Essieu 1



A este respecto, las reducciones máximas del ángulo de ataque obtenidas por las simulaciones (cuyos resultados han sido validados por los ensayos) son:

| Configuración | Suspensión primaria | Empate | Ángulo de ataque |
|---------------|-----------------------------|--------|------------------|
| Peralte 160 | Nominal | 2,5 m | 8 mrad |
| Perfil CAF | Reducción de la rigidez (½) | 2,5 m | 3,38 mrad |
| Perfil RE115 | Nominal | 2,2 m | 6,48 mrad |

| Configuración | Suspensión primaria | Empate | Ángulo de ataque |
|---------------|-----------------------------|--------|------------------|
| Peralte 50 | Nominal | 2,5 m | 7,79 mrad |
| Perfil SNCF | Reducción de la rigidez (½) | 2,5 m | 3,82 mrad |
| Perfil UIC60 | Nominal | 2,2 m | 6,27 mrad |

Las simulaciones (confirmadas) por los ensayos muestran que la variación del peralte (de 160 mm a 50 mm) y que la variación del contacto rueda/riel (CAF/RE115 a SNCF/UIC60) mejoran poco la inscripción en curva; 8 a 7.8 mrad

En lo que respecta a las fuerzas (Y, Q y el ratio Y/Q), medidas sobre riel, los análisis no han podido ser todavía completados sobre la base de los resultados disponibles, pero parece que el aumento de la insuficiencia no tiene consecuencias significativas sobre los principales criterios de comportamiento dinámico en curva.

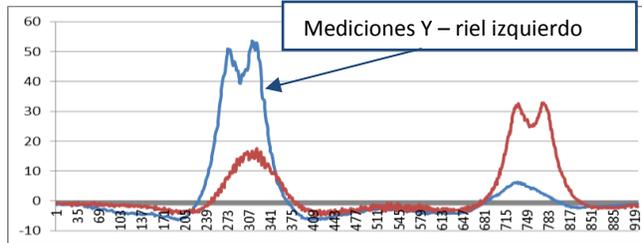
Lo mismo que para los ángulos de ataque, los valores medidos y sus variaciones están de acuerdo con los resultados de las simulaciones.

| Circulación | Velocidad Km/h | Insuficiencia mm | Parámetros dinámicos | | |
|-------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------|------|
| | | | Valores medios | | |
| | | | Y roue ext | Yessieu | Y/Q |
| M54 | 25 | -124 | 39 | 19 | 0,45 |
| M56 | 30 | -108 | 36 | 12 | 0,53 |
| M60 | 52 | -2 | / | | |
| M66 | 60 | 51 | 43 | 26 | 0,48 |
| M88 | 63 | 70 | 45 | 29 | 0,48 |
| M92 | 71 | 135 | / | | |

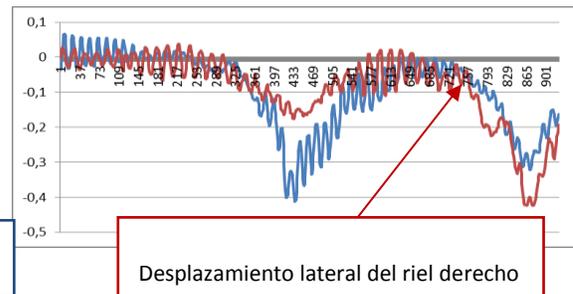
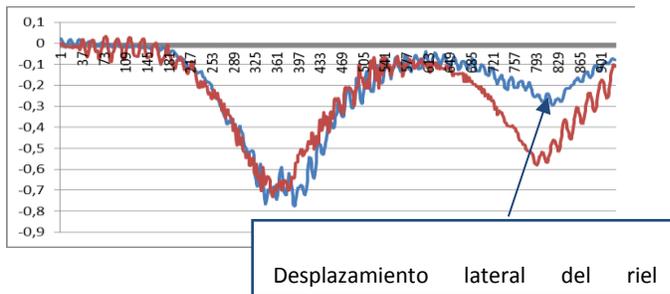
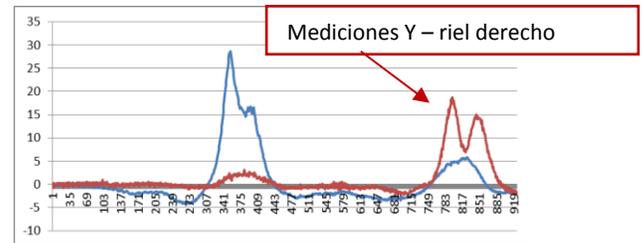
7.3.3 Consecuencias de la lubricación en el cruce de los aparatos de vía

El análisis de las fuerzas y los desplazamientos laterales del riel en el paso en vía desviase confirma varios puntos:

M31 – 25 km/h sin lubricación



M41 – 25 km/h con lubricación



Los diferentes ensayos efectuados a diferentes velocidades muestran que la lubricación reduce significativamente los esfuerzos en curva (reducción de 50 a 60%) y como consecuencia el basculamiento de los rieles y de las agujas en los aparatos se reducen un 50%.

A pesar de ello, se puede apreciar que en los aparatos de vía el bogie se inscribe con mucha dificultad y eso tiene como consecuencia que los ejes delanteros y traseros tienen el mismo comportamiento llevando a separar los rieles, y eso a cualquier velocidad ensayada (de 10 a 25 km/h).

En cambio, la lubricación en aparato de vía no tiene efectos positivos, es más, genera vibraciones al paso del tren por la vía desviada de radio muy reducido.

7.3.3.1 Síntesis de los resultados

7.3.3.1.1 Conclusión de los ensayos sobre el aspecto vibratorio

Los ensayos confirman las simulaciones realizadas y demuestran la vibración en flexión del eje del orden de 80 hz, en respuesta a las dificultades de inscripción del bogie en curva y como consecuencia de las sollicitaciones generadas por las fuerzas de rozamiento rueda/riel.

7.3.3.1.2 Conclusión de los ensayos desde el punto de vista del comportamiento cinemático y dinámico en curvas

El análisis de las rotaciones de los bogies con respecto a la caja, y de los ángulos de ataque de los bogies y de los ejes con respecto la vía, confirman que los elementos de rodamiento no se inscriben correctamente en las curvas cerradas. En particular, los ejes no se orientan prácticamente en la curva, y el ángulo resultante, aumentado por la falta de giro del bogie genera rozamientos y desgastes importantes.

Desde el punto de vista de las fuerzas Y y Q medidas, el criterio de descarrilamiento Y/Q es de 0.60 a 0.65 es un poco alto pero respeta el límite 0,80 fijado en la reglamentación internacional.

Por último, los ensayos muestran que la lubricación atenúa significativamente los esfuerzos en curva (reducción del 50 al 60 %) y, por consecuente, el volcado hacia fuera del riel y de las agujas en aparatos son reducidos de 50%

7.3.3.1.3 Conclusión sobre la validación de los modelos de simulación y de la influencia de las configuraciones ensayadas en el comportamiento en curva

Los resultados de los ensayos en las diferentes configuraciones confirman los resultados de las simulaciones y permiten validar los modelos de simulación y por lo tanto los resultados obtenidos por simulación.

8. CONCLUSIONES

8.1 Resumen de las causas

Finalmente, el análisis realizado por SYSTRA permite concluir que se ha llegado a la situación actual por diversas causas a diferente nivel:

8.1.1 Al nivel de la vía

8.1.1.1 Causas en la planeación y diseño

- El trazo del viaducto contiene 15 curvas de radio inferior a los 350 m de un total de 36
 - ➔ *El elemento determinante en la causa del desgaste ondulatorio es la dificultad para un tren de inscribirse correctamente en curvas de radios inferiores a los 350 m.*
- En las curvas 1 y 2 con radio de 100 m no se empleó una técnica adecuada como la que define la norma internacional (UIC-710) en lo relativo a la aplicación de un sobre ancho
 - ➔ *Deterioro de estas curvas generado por problemas de inscripción de los bogies.*
- Los peraltes utilizados de 160 mm, aunque está dentro de norma, no son adecuados en el viaducto ya que generan una altura de balasto excesiva.
 - ➔ *Dificultad de mantener una correcta nivelación.*
- Fijaciones de los rieles con aislador no adaptados al riel RE115 empleado
 - ➔ *Desgaste prematuro del aislador*
- Especificación de la instalación de un contra-riel que no es necesario y no permiten un mantenimiento correcto.
 - ➔ *Generación de problema de nivelación.*

8.1.1.2 Puesta en obra de la vía

- Las soldaduras no han sido realizadas de acuerdo a las normas y los procedimientos establecidos por el fabricante de las herramientas para realizar las soldaduras.
 - ➔ *Generación de impactos en las ruedas, que genera problemas de nivelación y desgaste de las soldaduras.*
- La liberación de esfuerzos en los largos rieles soldados (LRS) no se llevó a cabo de acuerdo a los procedimientos establecidos. Además, la metodología utilizada no garantiza una liberación de los LRS de calidad.
 - ➔ *Generación de problemas de nivelación.*

- Debido a la construcción de un muro central estructural, no permite ajustar el trazo de la vía
→ *Generación de problema de gálibo.*

8.1.1.3 *Calidad de los componentes de la vía*

- El balasto empleado, aunque cumple con la norma contractual, no es de calidad adecuada para esta Línea, de acuerdo con la normativa internacional UNE-EN-13450.
→ *Deterioro de la nivelación.*
- Problema de calidad del concreto en los durmientes tipo PRET que obligó a un cambio masivo de alrededor de 12.000 durmientes.
→ *Deterioro de la nivelación.*

8.1.1.4 *Mantenimiento de la vía*

- Durante la construcción y después de la puesta en servicio, el compactado del balasto no fue adecuado ya que no fue realizado uniformemente de forma mecanizada
→ *Generación de problema de nivelación y de problema de mezcla de los tipos de balastos.*
- Tardía atención para controlar el desgaste ondulatorio prematuro mediante el amolado o esmerilado
→ *Generación del desgaste ondulatorio exponencial.*

8.1.2 **Al nivel del material rodante**

8.1.2.1 *Defectos de diseño de los trenes*

- Vibraciones de los ejes a una frecuencia de 94Hz
→ *Generación de desgaste ondulatorio.*
- Problema de bogíes que no se inscribe correctamente en las curvas de radio reducido y aparatos de vía
→ *Generación del desgaste ondulatorio exponencial y esfuerzos anormales en la vía.*
- Problema del sistema de lubricación que no respeta las normas, ya que el lubricador no se encuentra ubicado de acuerdo con la norma
→ *El lubricador no lubrica en el punto indicado. Esto genera problemas sobre el desempeño de frenado.*
- Incompatibilidad de la dureza rueda/riel ya que la rueda es más dura que el riel
→ *Deterioro de la vía.*

8.1.2.2 Defectos de mantenimiento de los trenes

- El re-perfilado de las ruedas no se realizó oportunamente de acuerdo al desgaste prematuro presentado
- ➔ *Deterioro de la vía y desgaste exponencial de las ruedas*

8.1.3 Al nivel de la operación

8.1.3.1 Defectos de diseño

- Problema de compatibilidad peralte/velocidad en las curvas especificadas en la tabla 11 del apartado 3.3.1.2
- ➔ *Deterioro de la vía y de los trenes*

8.1.3.2 Reducciones de velocidades

Este punto es especial: por razón de seguridad, las reducciones de velocidades fueron inevitables teniendo en cuenta los desgastes en los trenes y la vía. Sin embargo, las reducciones de velocidades agravaron la problemática de la Línea.

- ➔ *Deterioro acelerado de la vía y de los trenes*

8.1.3.3 Mal funcionamiento del sistema de lubricación

Debido a los problemas de deslizamiento en frenado generado por el incorrecto punto de inyección, así como a la sobre-lubricación que causó contaminación de la mesa de rodadura del riel, y a la no obtención de una solución al problema desde la puesta en servicio, se decidió suprimir el sistema de lubricación.

- ➔ *Esto aumentó fuertemente los esfuerzos en el contacto rueda/riel, acelerando el deterioro del tren y de la vía.*

8.1.3.4 Rotación de los trenes

Con el fin de lograr un desgaste uniforme en las ruedas de ambos lados del tren, se proceder a rotar el sentido de avance del tren con una prioridad de 3 días. Esta operación no se realizó oportunamente, por lo que genero deformaciones mediante este sistema de rotación, obligando a un re-perfilado de las ruedas.

- ➔ *Disminuyendo considerablemente de la vida útil de las ruedas, deterioración de los aparatos de dilatación y aparatos de vía.*

8.2 Síntesis del Diagnóstico

Los diferentes componentes de la vía (rieles, durmientes, sistema de fijación) tomados individualmente, están conformes a las normas internacionales, con la excepción del balasto, el cual cumple con la norma contractual. Sin embargo, se encuentran en los límites de las tolerancias permitidas por dichas normas.

Las rupturas de ciertos componentes son la consecuencia del desgaste ondulatorio o de defectos de construcción de la vía o de una combinación de ambos.

La calidad geométrica de la vía es irregular. Los levantamientos demuestran los defectos de nivelación longitudinal y transversal de la vía y la deficiente calidad geométrica y metalúrgica de las soldaduras. El reemplazo masivo de los durmientes en ciertas zonas tuvo, igualmente, efectos sobre el deterioro de la geometría.

El desgaste ondulatorio está presente principalmente en las curvas con radios inferiores a los 350m y en las vías desviadas de aparatos. De ello se deduce que el desgaste ondulatorio es producido por el reducido radio de curvatura ya que es el único parámetro común entre ambas configuraciones: los aparatos se colocan sin peralte y se recorren a una velocidad reducida.

En cuanto a los parámetros de diseño del material rodante, aunque tomados individualmente tengan poca influencia sobre el comportamiento dinámico del tren, la combinación de los elementos escogidos en la especificación y el diseño del material rodante no es la más adecuada y aumenta los esfuerzos de rozamiento transmitidos y disipados en la vía, es también otra causa importante del desgaste ondulatorio y deterioro de los elementos de la vía.

De hecho, las simulaciones, los ensayos y la experiencia, demuestran que el elemento determinante en la causa del desgaste ondulatorio es la deficiente compatibilidad entre material rodante de este tipo y curvas de radios inferiores a los 350 m. Redes tales como la SNCF y RATP no utilizan este tipo de radio de curvatura más que de forma muy excepcional, ya que **la aparición de desgaste ondulatorio es inevitable**, aun con material rodante de tipo metro. De igual modo, cuando se utilizan este tipo de radios de curvatura, es primordial implementar un plan de mantenimiento adaptado, con el fin de controlar la aparición y la evolución del desgaste ondulatorio.

El diseño, la realización y la calidad de los materiales de la vía no permiten absorber las energías que aparecen durante la operación de los trenes en la Línea 12, lo que genera rápidamente deterioros al nivel del equipamiento de la vía.

La velocidad, la calidad baja del balasto de caliza, el peralte pronunciado y la calidad irregular de la geometría de la vía son factores agravantes y no son la causa de la aparición del desgaste ondulatorio.

En relación con la infraestructura civil, el comportamiento de las obras en el tramo en viaducto es normal, no hay riesgo de desarrollo vibratorio bajo el paso de los trenes por problemas estructurales.



SYSTRA confirma que el origen principal de los desgastes es un problema del trazo de la vía combinado con las características del material rodante FE10, las cuales aumentan los esfuerzos de rozamiento transmitidos a la vía.

La ausencia de gestión de las interfaces entre los sistemas material rodante y vía, ha causado que no se haya previsto que el material rodante escogido crearía esfuerzos en la vía que no podrían ser asumidos por esta. Por ello, el diseño de la vía no ha podido adaptarse a los esfuerzos excesivos generados por el tren, los cuales, sumados a defectos de construcción de la vía, no han permitido un mantenimiento adecuado desde el inicio de la operación de la Línea para poder controlar el desgaste ondulatorio previsible.

8.3 Acciones correctivas

SYSTRA entrega junto a este informe el documento “Acciones Correctivas de la Línea 12”, en cumplimiento a la etapa 2 de su prestación de servicio. El objetivo de las acciones correctivas es controlar el desgaste ondulatorio para poder restablecer el servicio en condiciones de seguridad y con unos costos de mantenimiento razonables. Las acciones correctivas serán dirigidas a:

- **Reducir la energía disipada en la vía,**
- **Reforzar la vía para absorber mejor las energías.**



9. ANEXOS



9.1 ANEXO: NORMA BALASTO

Norma europea: UNE-EN 13450, Diciembre 2003

Áridos para balasto

Norma europea: UNE-EN 13450/AC, Octubre 2004

Áridos para balasto, erratum



9.2 ANEXO: NORMA LUBRICACION

European Standard: prEN 15427, November 2005

Railway Applications - Wheel/Rail Friction Management – Flange Lubrication



9.3 ANEXO: NORMA PERFIL DE RUEDA

Norme Européenne: NF EN 13715+A1, Janvier 2011

Essieux montés et bogies

Roues — Profil de roulement