



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISI
Service suisse d'enquête de sécurité SESE
Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISI
Swiss Transportation Safety Investigation Board STSB

Rapporto d'inchiesta del Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISI

sul deragliamento di un treno
merci nella galleria di base del
San Gottardo

del 10 agosto 2023

a Faido (TI)

N. reg. 2023081002

Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISI
3003 Berna
Tel. +41 58 466 33 00, fax +41 58 466 33 01
info@sust.admin.ch
www.sisi.admin.ch

Informazioni generali sul presente rapporto

Il presente rapporto è stato redatto esclusivamente ai fini della prevenzione di incidenti e quasi incidenti nell'esercizio delle ferrovie. L'inchiesta di sicurezza e il presente rapporto non hanno pertanto esplicitamente lo scopo di determinare colpe o responsabilità¹. Se il presente rapporto viene utilizzato per scopi che esulano dalla prevenzione degli incidenti, se ne deve tenere debitamente conto.

Nel presente rapporto, per motivi di protezione della personalità, si utilizza la forma maschile per tutte le persone fisiche e le loro funzioni, indipendentemente dal loro sesso.

La **versione di riferimento (originale)** del presente rapporto è redatta in **lingua tedesca**.

¹ Articolo 15 della legge federale del 20 dicembre 1957 sulle ferrovie (Lferr), stato 1° luglio 2024 (RS 742.101) e articolo 20 comma 4 della direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio dell'11 maggio 2016 sulla sicurezza delle ferrovie.

Indice

1	Compendio.....	6
1.1	Breve descrizione dell'evento.....	6
1.2	Punti essenziali.....	7
1.3	Cause.....	7
1.4	Raccomandazioni e avvisi di sicurezza.....	7
	Glossario.....	9
2	Inchiesta.....	10
2.1	Decisione di avviare un'inchiesta.....	10
2.2	Motivazione della decisione.....	10
2.3	Portata e limiti dell'inchiesta.....	10
2.4	Squadra di inquirenti.....	10
2.5	Persone e servizi coinvolti nell'inchiesta.....	10
2.6	Qualità della cooperazione.....	11
2.7	Metodi e tecniche di inchiesta.....	11
2.8	Criticità.....	11
2.9	Interazioni con le autorità giudiziarie.....	12
3	Evento.....	13
3.1	Informazioni relative all'evento.....	13
3.1.1	Tipo di evento.....	13
3.1.2	Data, ora, luogo.....	13
3.1.3	Luogo dell'evento.....	13
3.1.4	Danni.....	14
3.1.5	Altre conseguenze.....	14
3.1.6	Persone e imprese coinvolte ed interessate.....	15
3.1.7	Materiale rotabile.....	16
3.1.8	Infrastruttura.....	25
3.1.9	Regolamento VPI.....	39
3.1.10	Sistema di gestione della sicurezza delle imprese di trasporto ferroviario.....	40
3.1.11	Manutenzione dei carri e delle sale montate.....	41
3.2	Esposizione dei fatti.....	42
3.2.1	Dinamica del deragliamento al cambio corsia di Faido.....	42
4	Analisi.....	46
4.1	Ruoli e mansioni.....	46
4.1.1	Impresa ferroviaria o imprese ferroviarie e/o gestore o gestori dell'infrastruttura 46	
4.1.2	Soggetto responsabile della manutenzione.....	46
4.1.3	Analisi della registrazione dei dati.....	47
4.2	Materiale rotabile e impianti tecnici.....	49

4.2.1	Sala montata BA 390	49
4.2.2	Carro 11 (carro 466-2).....	50
4.2.3	Controllo e misurazione delle sale montate dei carri 11 e 14	51
4.2.4	Perizia – esame metallurgico delle sale	55
4.2.5	Sintesi dei risultati dell'esame metallurgico	62
4.2.6	Controllo tecnico prima del licenziamento del treno.....	66
4.3	Fattori umani.....	66
4.3.1	Caratteristiche umane e individuali	66
4.3.2	Fattori e incarichi organizzativi:.....	66
4.4	Meccanismi di feedback e di controllo,.....	66
4.4.1	Quadro-legislativo	66
4.4.2	Safety Management System.....	67
4.4.3	Processi.....	67
4.4.4	Attività di supervisione.....	68
4.4.5	Autorizzazioni, certificati e rapporti di valutazione.....	68
4.4.6	Rilevatore di deragliamento	69
4.5	Simili eventi precedenti – rotture di ruote	70
4.6	JNS Broken Wheels Gotthard.....	70
4.7	Analisi della letteratura	70
4.7.1	Studio svedese –comportamento termo-meccanico di ruote frenate a ceppi. 70	
4.7.2	Wheel Tread Damage Guide T 963	71
4.7.3	Sintesi.....	72
5	Conclusioni.....	73
5.1	Sintesi.....	73
5.1.1	Impresa di trasporto ferroviario	73
5.1.2	Infrastruttura	73
5.1.3	Materiale rotabile.....	74
5.1.4	Innesco delle cricche – cricche a fatica – rottura della ruota	77
5.1.5	Safety Management System FFS Cargo SA, eseguire il servizio di trasporto 77	
5.2	Misure adottate dopo l'evento.....	78
6	Raccomandazioni di sicurezza.....	79
6.1	Sale con soole dei freni LL, diametro minimo in esercizio.....	79
6.1.1	Deficit di sicurezza	79
6.1.2	Raccomandazione di sicurezza n. 205.....	80
6.2	Esame a ultrasuoni della ruota, linee guida VPI	80
6.2.1	Deficit di sicurezza	80
6.2.2	Raccomandazione di sicurezza n. 206.....	81
6.3	Influsso delle soole dei freni in materiale composito attraverso la sollecitazione termica delle ruote.....	81
6.3.1	Deficit di sicurezza	81

6.3.2	Raccomandazione di sicurezza n. 207	82
6.4	Scambi Hydrostar.....	82
6.4.1	Deficit di sicurezza	82
6.4.2	Raccomandazione di sicurezza n. 208.....	82
7	Avviso di sicurezza.....	83
7.1	Safety Management System FFS Cargo SA, sezione Preparazione del treno.....	83
7.1.1	Deficit di sicurezza	83
7.1.2	Avviso di sicurezza n. 54	83

1 Compendio

1.1 Breve descrizione dell'evento

Il 10 agosto 2023 il treno merci 45016, operato da FFS Cargo e composto da due locomotive BR 185 e 30 carri merci di vario tipo e di diversi proprietari, stava percorrendo la tratta Chiasso—Basilea.

Mentre il treno 45016 era in transito tra Giubiasco e Bellinzona, un macchinista che viaggiava in direzione opposta ha notato del fumo provenire da uno dei carri e ha informato la centrale d'esercizio Sud delle FFS di Pollegio. Intorno alle ore 10.33, con l'arrivo del treno 45016 alla stazione di Bellinzona e il suo arresto per un cambio di macchinista programmato, il macchinista del treno 45016 riceveva tali informazioni. Richiesto l'intervento di un controllore tecnico, questi provvedeva a disinserire i freni del carro 14 a seguito della segnalazione. Dopo una prova dei freni con esito positivo, alle ore 12.07 il treno 45016 proseguiva la sua corsa in direzione nord.

Circa 10 km dopo l'ingresso nel portale sud della galleria di base del San Gottardo – al km ferroviario 47 con una velocità di 90 km/h, – un frammento si staccava dalla ruota destra (Figura 19) del primo assile in direzione di marcia dell'undicesimo carro, seguito a breve distanza da altri frammenti di ruota (Figura 20–Figura 26). Al km 46.7 (Figura 25, Figura 41) l'assile perdeva la guida sul binario, deragliando, e da quel momento in poi pendeva in diagonale sotto il carro.

In queste condizioni il treno merci ha proseguito la corsa per altri 7 km circa, fino alla stazione multifunzionale di Faido (Figura 30), percorrendo contro la punta il primo deviatore (W387) di cambio corsia. L'assile, sospeso in posizione obliqua sotto il carro 11, distruggeva le traverse monoblocco in cemento armato e tutti meccanismi di azionamento dello scambio, danneggiando gravemente anche le rotaie e il cuore. Venuta meno la sorveglianza dello scambio a causa della sua distruzione, il sistema di sicurezza ETCS attivava istantaneamente una frenata d'emergenza del treno.

Il successivo scambio W386 della stazione multifunzionale di Faido, percorso di punta, veniva anch'esso completamente distrutto dall'assile 1 del carro 11, sospeso in posizione obliqua sotto di esso. Gli assili 2–4 del carro 11 e i successivi carri 12–13 si immettevano ancora dritti nel binario 7000, per poi deragliare e successivamente fermarsi, in posizione inclinata, circa 150 m dopo la parete trasversale tra le due gallerie (Figura 8). Il primo assile del carro 14 procedeva anch'esso dritto verso il binario 7000, mentre il secondo assile percorreva lo scambio W386 imboccando il tratto deviato verso il binario di raccordo alla canna est (Figura 9). La prima parte del carro 14 veniva pertanto sollevata e spinta al di sopra della mensola centrale rialzata in calcestruzzo, schiantandosi contro la parete trasversale tra il binario 7000 e il binario di raccordo (Figura 9). L'urto provocava infine il distacco del convoglio tra il carro 13 e 14. La seconda parte del carro 14 (assili 3–4) si immetteva sul binario di raccordo e, dopo aver sfondato la porta di cambio corsia verso la canna est (binario 6000), si fermava in posizione inclinata (Figura 11).

In seguito alla dinamica di svio deragliavano anche i carri da 15 a 26.

I danni all'infrastruttura e ai carri deragliati sono stati ingenti.

1.2 Punti essenziali

Mezzo di trasporto Ferrovia

Imprese coinvolte

Impresa di trasporto ferro- viario FFS Cargo SA (SBBC), Olten

Gestore dell'infrastruttura FFS SA, Infrastruttura (SBBI), Berna

Altre imprese Vari detentori di carri svizzeri ed esteri, tra cui TRASWAGGON (TWA), Helsingborg (SWE)

Veicoli coinvolti Due locomotive e trenta carri merci di diversi tipi, tra cui
carro 11, Laaiis 24 74 422 0 466-2, S-TWASE

1.3 Cause

La causa del deragliamento del treno merci 45016 nella galleria di base del San Gottardo è la rottura della ruota destra del primo assile del carro 11, con successiva perdita della guida sul binario dell'assile sottostante il carro e la conseguente distruzione dei deviatori di cambio corsia di Faido.

La rottura della ruota è dovuta a un sovraccarico termico della superficie di rotolamento, con formazione di cricche a fatica perpendicolari a seguito di eccessive tensioni residue di trazione sulla superficie di rotolamento della ruota che, propagatesi fino al disco, hanno successivamente comportato la frattura della ruota. Lo sviluppo delle suddette cricche è stato relativamente lento e si è protratto per un lungo periodo difficilmente quantificabile.

Al verificarsi dell'incidente e ai conseguenti danni hanno contribuito i seguenti fattori:

lo scambio Hydrostar W386, con elementi di posizionamento e bloccaggio situati sopra lo spigolo superiore delle traverse, è stato distrutto dall'assile rimasto sospeso diagonalmente verso il basso, ritrovandosi in una posizione indefinita con conseguente assenza di un percorso prestabilito.

1.4 Raccomandazioni e avvisi di sicurezza

Nel presente rapporto vengono formulate 4 raccomandazioni di sicurezza e un avviso di sicurezza.

Il testo della traduzione in inglese si trova nel rapporto redatto in lingua tedesca.

Il testo della traduzione in inglese si trova nel rapporto redatto in lingua tedesca.

Glossario

DE-OFerr	Disposizioni d'esecuzione dell'ordinanza del 15 dicembre 1983 sulle ferrovie, stato 1° novembre 2020 (RS 742.141.11)
CUU	Contratto uniforme d'utilizzazione dei carri merci. Il preambolo del contratto recita: <i>L'utilizzazione di carri merci quale mezzo di trasporto da parte delle imprese di trasporto ferroviario (ITF) presuppone la definizione di disposizioni contrattuali che sanciscano i diritti e gli obblighi delle parti.</i>
UFT	Ufficio federale dei trasporti
CIS	Cargo Information System, oggi ZIS (ZugsinformationsSystem)
COTIF	Convenzione relativa ai trasporti internazionali per ferrovia
DED	Dragging Equipment Detection: localizzazione dei profili verso il basso
OFerr	Ordinanza del 23 novembre 1983 sulla costruzione e l'esercizio delle ferrovie (ordinanza sulle ferrovie), stato 1° gennaio 2021 (RS 742.141.1)
ECM	Entity in Charge of Maintenance (soggetto responsabile della manutenzione)
ERA	European Union Agency for Railways – Agenzia dell'Unione europea per le ferrovie
ETCS	European Train Control System
PCT	Prescrizioni svizzere del 4 novembre 2019 sulla circolazione dei treni (R 300.1–.15), stato 1° luglio 2020 (RS 742.173.001)
FS	Full Supervision
GBG	Galleria di base del San Gottardo
HFO	Impianto per la localizzazione delle boccole surriscaldate / dei freni bloccati
LL	«low noise, low friction» (poco rumore, poco attrito)
W	Carro merci
TSS	Treno di spegnimento e salvataggio FFS Infrastruttura
MA	Movement Authority
SMF	Stazione multifunzionale
PAO	Impianto di localizzazione di profili e antenne
RBC	Radio Block Center
RLC	Checkpoint del carico per ruota: pesa a ponte per il riconoscimento di carichi asimmetrici, sovraccarichi e ovalizzazioni delle ruote di treni in movimento.
RSSB	Rail Safety and Standards Board
SN/EN 13262	Applicazioni ferroviarie – Sale montate e carrelli – Ruote. Requisiti del prodotto, versione 2020, <i>[valida per acciai di qualità ER 7]</i>
CTC	Controllore tecnico Cargo
STI	Sistemi tecnici d'interoperabilità
UES	Unconditional Emergency Stop
VAP	Associazione dei trasportatori svizzeri
VPI	Associazione dei detentori di carri merci privati
VPI-01	Linee guida VPI EMG, Manutenzione di carri merci, Sezione generale
VPI-04	Linee guida VPI EMG, Manutenzione di carri merci, Sale montate
VPI-09	Linee guida VPI EMG, Manutenzione di carri merci, Controllo non distruttivo
CND	Controllo non distruttivo
ICT	Impianti di controllo dei treni dell'infrastruttura lungo la linea

2 Inchiesta

2.1 Decisione di avviare un'inchiesta

In data 10 agosto 2023, alle ore 14:00, il Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza (SISI) ha ricevuto la notizia del deragliamento di un treno merci nella galleria di base del San Gottardo. Il SISI ha aperto un'inchiesta e ha pubblicato il relativo rapporto preliminare.

2.2 Motivazione della decisione

La decisione di apertura di un'inchiesta da parte del SISI è stata presa conformemente all'articolo 20 OIET² e in applicazione dei criteri di cui all'articolo 3 lettera a, articolo 4 e in esecuzione dell'articolo 20 comma 1 della direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio dell'11 maggio 2016 sulla sicurezza delle ferrovie.

2.3 Portata e limiti dell'inchiesta

Dopo i primi esiti dell'esame metallurgico sulla ruota fratturata, il SISI ha stilato un rapporto intermedio con due raccomandazioni di sicurezza, pubblicato in data 22 settembre 2023. Nel SIS³ è stato inoltre diramato un Safety Alert.

Oltre alle indagini sulla causa che ha portato alla rottura della ruota, il SISI ha esaminato altri elementi, quali il sistema di sorveglianza ICT e gli scambi Hydrostar. Nelle considerazioni si è tenuto conto della letteratura tecnica esistente in materia e delle pubblicazioni di studi e ricerche sul tema.

2.4 Squadra di inquirenti

L'inchiesta è stata diretta da un inquirente del SISI, sostenuto a seconda del settore da altri inquirenti esterni e indipendenti incaricati. I dati personali sottostanno alla protezione dei dati conformemente al diritto svizzero.

2.5 Persone e servizi coinvolti nell'inchiesta

Nell'ambito dell'inchiesta sono state sentite le persone, le imprese e gli enti coinvolti nell'incidente, che hanno fornito informazioni tecnicamente determinanti ai fini delle indagini:

- impresa di trasporto ferroviario;
- gestore dell'infrastruttura;
- detentore del carro;
- ECM
- macchinista;
- controllori tecnici.

² RS 742.161

³ SIS: il Safety Alert System SIS è un sistema che consente alle autorità di sorveglianza e d'inchiesta di scambiarsi fra loro avvisi di sicurezza.

Al termine dell'inchiesta, è stata preparata una bozza di rapporto che è stata trasmessa per parere alle persone direttamente interessate dall'inchiesta e a quelle in essa direttamente coinvolte conformemente all'articolo 47 capoverso 4 OIET.

2.6 Qualità della cooperazione

L'organo d'inchiesta svedese (NIB-SE) è stato prontamente informato dal SISI in merito al deragliamento nella GBG, essendo il carro 11 con l'assile difettoso immatricolato in Svezia. Il NIB-SE ha reperito i dati di contatto del detentore del carro in Svezia. Il SISI ha regolarmente aggiornato il NIB-SE in merito allo stato di avanzamento dell'inchiesta. La collaborazione tra SISI e NIB-SE è stata ineccepibile.

2.7 Metodi e tecniche di inchiesta

Ai fini dell'inchiesta erano a disposizione e sono stati esaminati:

- rilievi sul luogo dell'incidente;
- foto;
- perizie metallurgiche;
- vari protocolli di misura;
- dati relativi alla corsa del treno;
- registrazioni dati degli impianti di sicurezza, della tecnica di comando e degli impianti di controllo dei treni;
- videosorveglianza della stazione multifunzionale di Faido;
- dati tecnici dei carri;
- documentazioni relative alla manutenzione;
- piani dei binari;
- interrogatori dei soggetti coinvolti;
- letteratura tecnica e pubblicazioni.

2.8 Criticità

Durante l'inchiesta sul posto, il SISI ha dovuto affrontare le seguenti criticità:

- la temperatura durante la raccolta delle prove e il recupero dei frammenti in galleria nei pressi della stazione multifunzionale (SMF) di Faido era di circa 42°C;
- spazi estremamente ristretti per il recupero in galleria dei frammenti necessari ai fini dell'inchiesta;
- il lungo periodo intercorso tra il giorno dell'incidente, il 10 agosto 2023, e il 18 settembre 2023, quando si è avuto accesso agli ultimi carri rilevanti ai fini dell'inchiesta.

2.9 Interazioni con le autorità giudiziarie

Il SISI conduce l'inchiesta indipendentemente dalla procedura delle autorità giudiziarie. Soltanto in fase di raccolta dei fatti (art. 23 cpv. 2 OIET⁴) vi è stato un coordinamento con il Ministero pubblico del Cantone Ticino. Su richiesta, sono stati messi a disposizione del Ministero pubblico del Cantone Ticino i risultati dell'esame metallurgico commissionato dal SISI.

⁴ RS 742.161

3 Evento

3.1 Informazioni relative all'evento

3.1.1 Tipo di evento

Deragliamento di un treno merci

3.1.2 Data, ora, luogo

10 agosto 2023, ore 12:50 ca., galleria di base del San Gottardo, SMF Faido

3.1.3 Luogo dell'evento

La galleria di base del San Gottardo, lunga 57 km, è costituita da due canne parallele tra loro. Il portale nord si trova a Erstfeld (km 0 della galleria), quello sud a Bodio (km 57). L'interasse medio tra le due canne è di 40 metri. Ogni 325 m sono presenti cunicoli trasversali pressurizzati che collegano le due canne.

In due punti, situati a un terzo della galleria in corrispondenza di Faido e Sedrun, si trovano stazioni multifunzionali con fermate d'emergenza e cambi corsia tra le due canne.



Figura 1: Carta sinottica del luogo dell'incidente. Fonte della carta: Ufficio federale di topografia.

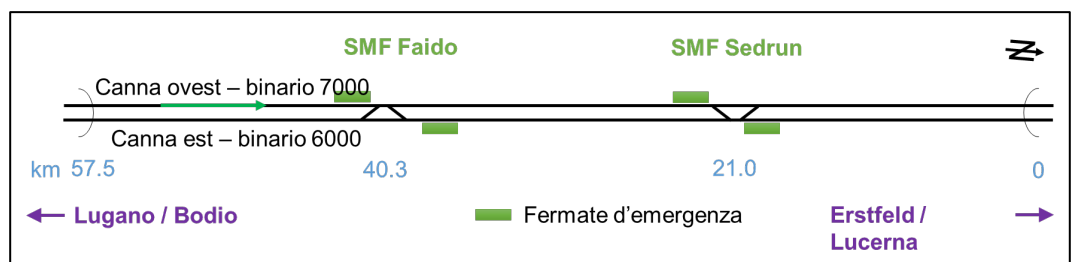


Figura 2: Rappresentazione schematica della galleria di base del San Gottardo.

Nota: **freccia verde:** direzione di marcia del treno 45016. La si ritroverà anche nelle immagini seguenti a fini di orientamento.

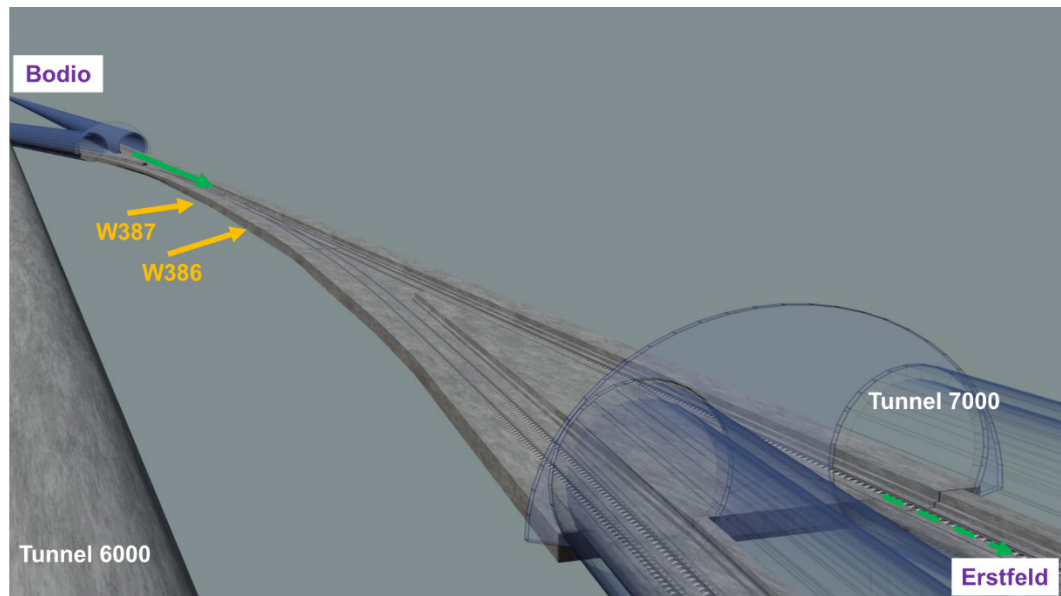


Figura 3: Stazione multifunzionale di Faido.

3.1.4 Danni

3.1.4.1 Persone
Nessuno.

3.1.4.2 Veicoli
I carri deragliati e in parte ribaltatisi hanno subito ingenti danni, alcuni sono andati completamente distrutti. La composizione del treno con i carri coinvolti è riportata all'allegato 1.

3.1.4.3 Infrastruttura
L'infrastruttura nei pressi della stazione multifunzionale di Faido è stata pesantemente danneggiata. I due scambi e la porta di cambio corsia in corrispondenza del raccordo alla canna est sono andati completamente distrutti.
I danni all'infrastruttura tra il km 47 e il km 40 sono illustrati al capitolo 3.1.8.1.3.

3.1.5 Altre conseguenze

A 42 giorni dall'incidente tutti i veicoli risultavano recuperati dalla galleria.
Dopo l'incidente entrambe le canne hanno dovuto essere chiuse alla circolazione.
L'esercizio nella canna est (binario 6000) è stato nuovamente autorizzato, a velocità ridotta, il 23 agosto 2023, dopo l'installazione provvisoria di un portellone mobile per la manutenzione al cambio corsia di Faido.
Durante la chiusura totale della galleria di base tutti i treni sono stati deviati sulla tratta di montagna del San Gottardo, con un notevole allungamento dei tempi di percorrenza.
La riapertura completa della galleria è avvenuta il 2 settembre 2024.

3.1.6 Persone e imprese coinvolte ed interessate**3.1.6.1 Imprese coinvolte e interessate****3.1.6.1.1 Gestore dell'infrastruttura**

FFS SA, Infrastruttura (SBBI), Berna

3.1.6.1.2 Impresa di trasporto ferroviario

FFS Cargo SA (SBBC), Olten

3.1.6.1.3 Detentore del veicolo

Carro nr.11 e Carro nr.14: TRANSWAGGON AB, TWA, Svezia

3.1.6.1.4 ECM del carro numero 11

ECM da 1 a 3, TRANSWAGGON AG Zug

ECM 4, diversi

3.1.6.2 Persone coinvolte e interessate – personale ferroviario**3.1.6.2.1 Macchinista treno 45016 Chiasso–Bellinzona**

Persona	Classe 1977 assunto da SBBC
---------	--------------------------------

Licenza	Licenza ⁵ UFT categoria B
---------	--------------------------------------

Entrata in servizio	10 agosto 2023 a Chiasso
---------------------	--------------------------

3.1.6.2.2 Macchinista treno 45016 Bellinzona–GBG

Persona	Classe 1982 assunto da SBBC
---------	--------------------------------

Licenza	Licenza UFT categoria B
---------	-------------------------

Entrata in servizio	10 agosto 2023 a Bellinzona
---------------------	-----------------------------

3.1.6.2.3 Controllore tecnico Cargo Chiasso

Persona	Classe 1967 assunto da SBBC
---------	--------------------------------

Licenza	Controllore tecnico CTC Cargo, attivo in questa funzione dal 1990
---------	--

3.1.6.2.4 Controllore tecnico Cargo Bellinzona

Persona	Classe 1980 assunto da SBBC
---------	--------------------------------

Licenza	Controllore tecnico CTC Cargo, attivo in questa funzione dal 2006
---------	--

⁵ UFT: Ufficio federale dei trasporti

3.1.7 Materiale rotabile

3.1.7.1 Treno 45016

3.1.7.1.1 Descrizione

Il treno merci 45016, composto da due locomotive (BR 185) e 30 carri merci di vario tipo, percorreva la tratta Chiasso—Basilea.

3.1.7.1.2 Locomotive

In testa al treno vi erano le locomotive BR 185 110-4 (occupata) e BR 185 104-7 (comandata a distanza). I controlli tecnici effettuati dal SISI non hanno riscontrato anomalie.

3.1.7.1.3 Carri 1–10

I carri 1–10 sono stati esaminati dal SISI in galleria e successivamente anche al di fuori.

Tutti i freni erano attivi e tutti i dispositivi d'inversione erano in posizione «G». Tutti i carri erano in condizioni regolari. Il controllo dei carri da 1 a 9 non ha riscontrato anomalie.

Il tenditore a vite tra il carro 10 e 11 (Figura 4) manteneva piuttosto stabilmente la parte anteriore del carro 11 in posizione verticale, impedendo che l'assile 1 dell'undicesimo carro giacesse completamente a terra.

Di conseguenza, la guida del gancio di trazione dell'ultimo tenditore posteriore del carro 10 era leggermente piegata verso il basso.



Figura 4: Immagine del tenditore tra il carro 10 e 11 dopo l'arresto del treno. Nell'area al di sotto della freccia rossa si trova l'assile 1 con la ruota fratturata dell'undicesimo carro.

3.1.7.1.4 Carro 11

Il carro 11 (24 74 422 0 466-2) constava di due semicarri ad aggancio corto di tipo Laaiis con due assili. I frammenti di ruota provengono dalla ruota destra dell'assile 1. L'assile non era più posizionato in trasversale a 90° sotto la cassa del veicolo, bensì era stato spinto all'indietro di circa 45° in direzione di marcia (Figura 5), mentre i pacchi di molle a balestra sono rimasti fissati alla cassa del carro.

I due triangoli del freno dell'assile 1 risultavano fortemente danneggiati in prossimità del porta suole (Figura 6). Il porta suole posteriore destro, in direzione di marcia, era in gran parte distrutto e presentava massicce abrasioni dovute allo strisciamento sul pavimento di cemento.

Gli assili 2-4 erano intatti. Tutte le ruote e alcune boccole presentavano danni riconducibili allo svio.

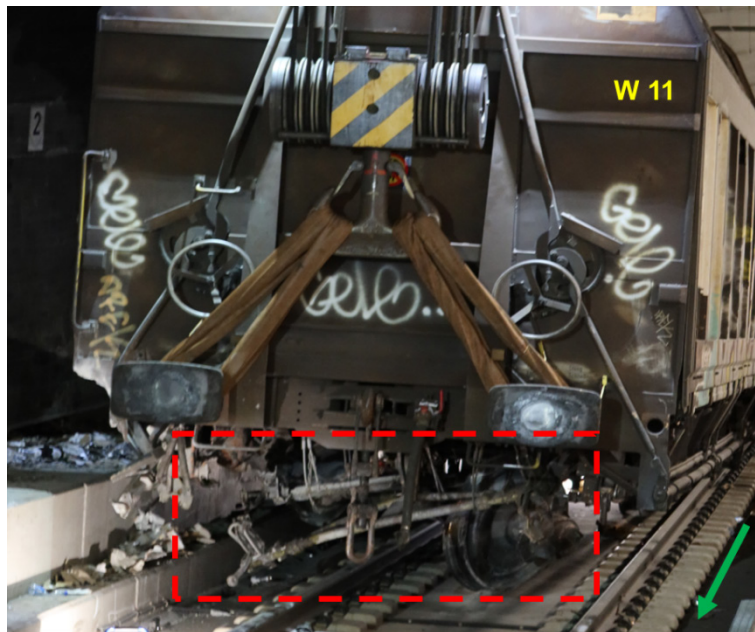


Figura 5: Carro 11. Al centro, l'assile spostato all'indietro di circa 45° con la ruota spezzata.



Figura 6: Immagine dettagliata dell'assile. Nel cerchio di colore giallo si vede ciò che resta della ruota spezzata. In primo piano il triangolo del freno anteriore, in direzione di marcia, pendente verso il basso.

3.1.7.1.5 Carri 12–13

A parte i danni causati dal deragliamento, al controllo visivo dei carri 12 (Figura 7) e 13 (Figura 8) non sono stati riscontrati difetti.



Figura 7: Carro 12 (fonte: Polizia cantonale TI).



Figura 8: Carro 13 (fonte: Polizia cantonale TI).

3.1.7.1.6 Carro 14

Il carro 14 è dello stesso tipo del carro 11, con due semicarri ad aggancio corto munite di due assili [qui di seguito nel rapporto si utilizzano le denominazioni *carro 14-1* e *14-2*]. Il primo assile (A1) si trovava in galleria sotto la cassa del carro 14-1 (binario 7000) (Figura 9), il secondo (A2) sotto il carro 14-1 sul binario di raccordo verso il binario 6000. La cassa del carro 14-1 si era schiantata contro la parete trasversale tra le due gallerie, andando completamente distrutta.



Figura 9: Il carro 14-1, completamente distrutto, è appoggiato trasversalmente alla parete della galleria sulla mensola centrale (immagine scattata in direzione di marcia) tra il binario 7000 e il binario di raccordo alla canna est. La linea rossa tratteggiata riproduce il profilo effettivo del carro 14-1. I carri 14-2, 15 e 16 si sono fermati all'interno della galleria di raccordo in direzione della canna est.



Figura 10: Immagine dettagliata del carro 14-1. La linea rossa tratteggiata riproduce la posizione del pavimento del carro.

La cassa del carro 14-2 ha abbattuto la porta di cambio corsia fissa, normalmente chiusa, in direzione della canna est (binario 6000). Il terzo assile del carro 14 è stato divelto e proiettato oltre la porta di cambio corsia sulla banchina di cemento in prossimità della canna est, accanto al carro (Figura 11).

Il quarto assile era rimasto intatto nella sua posizione originaria sotto la cassa del carro, davanti alla porta di cambio corsia (Figura 12).

I freni del carro 14 erano disinseriti.

Dopo il recupero i quattro assili del carro 14 sono stati esaminati approfonditamente presso un'officina di manutenzione.

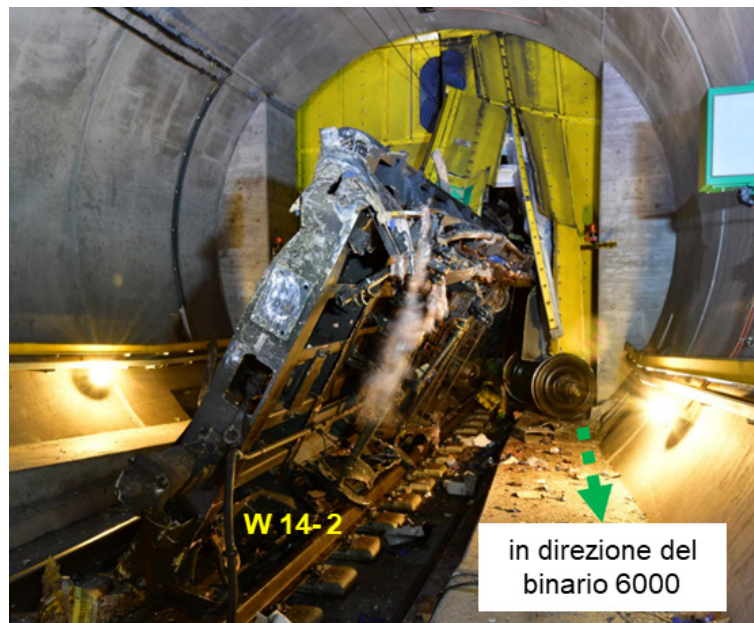


Figura 11: Il carro 14-2 ha abbattuto la porta di cambio corsia. A destra, sulla banchina si trova l'assile 3 divolto (immagine scattata dalla canna est in direzione opposta a quella di marcia).



Figura 12: Ruota destra, in direzione di marcia, dell'assile 4 del carro 14-2. La metà posteriore del carro non ha sbattuto contro la porta di cambio corsia, fermandosi prima. L'assile era sospeso nella sua posizione originaria, i freni erano allentati.

3.1.7.1.7 Carro 15

Il carro 15 si trovava dietro la seconda parte del carro 14 all'interno della galleria di raccordo, poco prima della porta di cambio corsia, ed era ribaltato.

L'assile 1 non presentava danni ai bordini delle ruote (Figura 13). Il triangolo e le suole del freno erano intatti.

Gli assili 2–4 presentavano gravi danni ai bordini delle ruote.



Figura 13: Carro 15, assile 1, ruota sinistra.

3.1.7.1.8 Carri 16–26

I carri 16–26 si trovavano dopo lo scambio W386 sul binario di raccordo in direzione della canna est (binario 6000).

A parte i danni causati dal deragliamento, al controllo visivo di tutti i carri non sono stati riscontrati altri difetti.



Figura 14: Carro 19 (portellone scorrevole aperto e spostamento del carico in seguito all'impatto).



Figura 15: Carri 20 e 21.



Figura 16: Carri 21 e 22 (fonte: Polizia cantonale TI).



Figura 17: Carro 24 (fonte: Polizia cantonale TI).

3.1.7.1.9 Carri 27–30

Gli ultimi quattro carri del treno (carri 27–30) non sono deragliati. Al controllo visivo dei carri non sono stati riscontrati difetti. Per quanto riguarda i carri 27–29, si tratta di cisterne con il numero di contrassegno merce pericolosa UN 1093 (acrilonitrile stabilizzato) e il numero di codifica di pericolo 336. I carri cisterna erano vuoti e non puliti.



Figura 18: Carro 30 in coda al treno (fonte: Polizia cantonale TI).

3.1.7.1.10 Accertamenti

In galleria, all'altezza del km 47.30 è stato rinvenuto il primo frammento di ruota dell'assile 1 del carro 11 (Figura 19). Tra il km 47.10 e il km 46.70 ne sono stati individuati altri sei (Figura 20–Figura 25).

L'ultimo frammento è stato rinvenuto in prossimità del primo scambio W387 della stazione multifunzionale di Faido, all'altezza del km 40.50 (Figura 26).



Figura 19: Primo frammento [1] all'altezza del km 47.30.



Figura 20: Frammento [2] all'altezza del km 47.10.



Figura 21: Frammento [3] all'altezza del km 46.93.



Figura 22: Frammento [4] all'altezza del km 46.90.



Figura 23: Frammento [5] all'altezza del km 46.80.



Figura 24: Frammento [6] all'altezza del km 46.77.



Figura 25: Frammento [7] all'altezza del km 46.70.



Figura 26: Frammento [8] all'altezza del km 40.50.

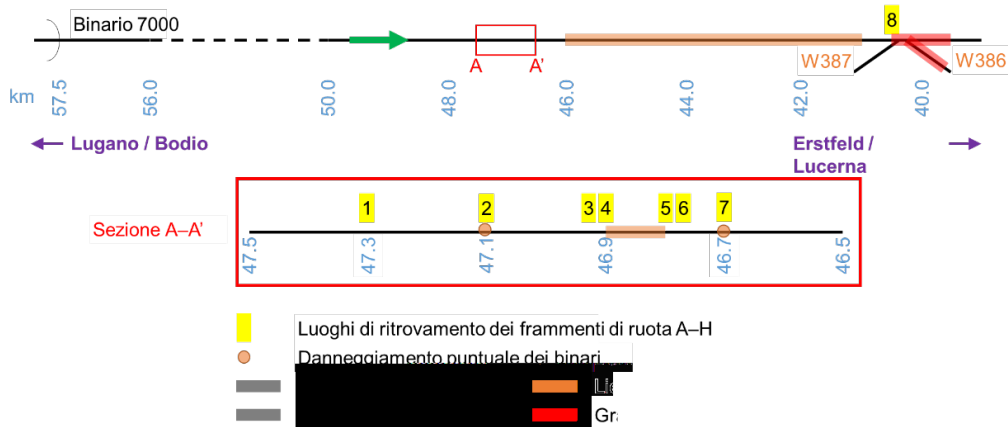


Figura 27: Rappresentazione schematica dei luoghi di ritrovamento dei frammenti [1] – [8].

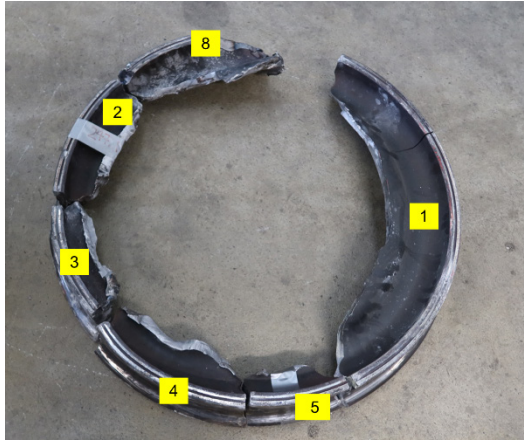


Figura 28: Ricostruzione dei frammenti.

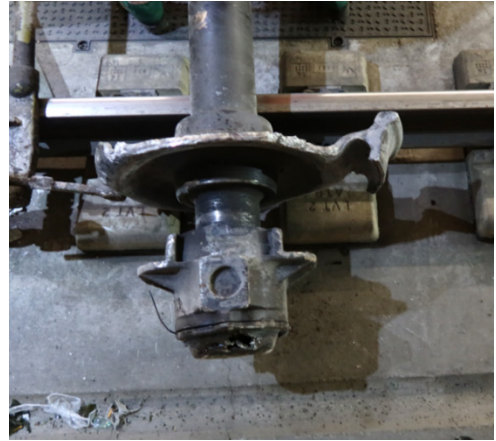


Figura 29: Parte restante della ruota destra fratturata.

3.1.8 Infrastruttura

3.1.8.1 Impianto ferroviario

3.1.8.1.1 Descrizione della stazione multifunzionale di Faido

Alla stazione multifunzionale di Faido è presente, oltre alle fermate d'emergenza nelle due gallerie, un cambio corsia tra le due canne. Si tratta di collegamenti utilizzati principalmente durante gli interventi di manutenzione o in caso di guasti operativi per passare nell'altra canna. Di norma i treni diretti verso sud utilizzano la canna est (binario 6000), quelli diretti a nord la canna ovest (binario 7000). In caso di cambio corsia occorre aprire le apposite porte, normalmente chiuse, nelle rispettive gallerie di raccordo. Tali porte impediscono che l'elevata pressione dell'aria generata dal transito dei treni si riversi nell'altra canna. In caso di incendio in galleria, inoltre, evitano che il fumo passi da una canna all'altra. Nella canna ovest sono installati due scambi ad alta velocità (W386 e W387) (Figura 30, Figura 31). Il primo scambio in direzione nord W387 viene percorso di calcio, il secondo scambio W386 di punta. La distanza tra la punta dello scambio W386 e la porta di cambio corsia è pari a circa 270 m.

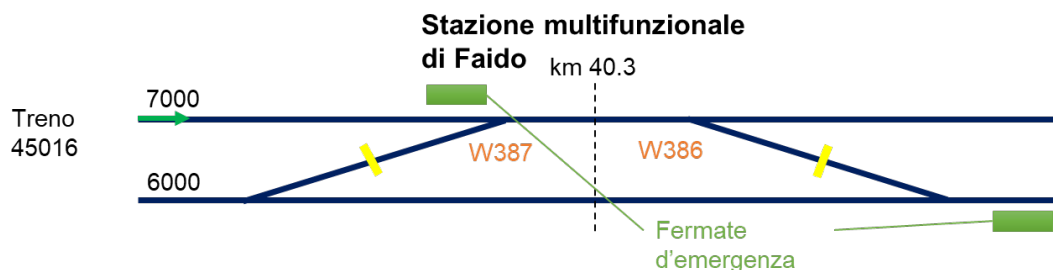


Figura 30: Rappresentazione schematica della stazione multifunzionale di Faido. Giallo: porte di cambio corsia.



Figura 31: Rappresentazione grafica della stazione multifunzionale di Faido con la posizione dei veicoli dopo l'arresto.

3.1.8.1.2 Descrizione semplificata del funzionamento dello scambio Hydrostar

Gli scambi W386 e W387 sono scambi ad alta velocità di tipo Hydrostar⁶. I fermascambi sono muniti di attuatori idraulici, anziché elettromeccanici-tradizionali. Anche il cuore a punta mobile è a comando idraulicamente. Gli aghi e il cuore a punta mobile vengono chiusi e bloccati in posizione finale in maniera idraulica.

I fermascambi e i tiranti di accoppiamento degli aghi, che fungono da back-up per la chiusura di punta, sono posizionati sopra lo spigolo superiore della traversa (Figura 33).

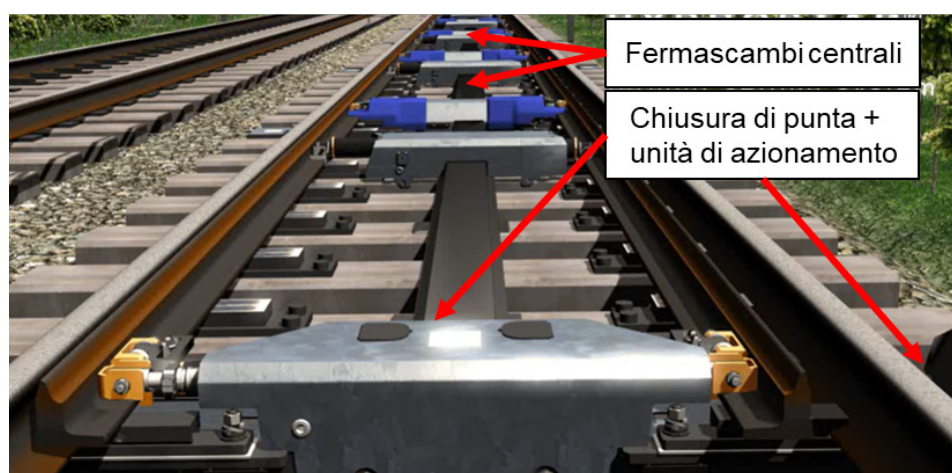


Figura 32: Cassa di manovra degli aghi di uno scambio Hydrostar (fonte: Voestalpine, descrizione dei componenti: SIS1).

In alto, al centro si trova la chiusura di punta e i tiranti di accoppiamento tra fermascambio e aghi. La posizione finale degli aghi viene monitorata mediante una serie

⁶ Marchio registrato di Voestalpine

di contatti presenti nella chiusura di punta e nei tiranti di accoppiamento, nonché attraverso la pressione idraulica (Figura 33). Tutti i componenti si trovano sopra lo spigolo superiore della traversa.

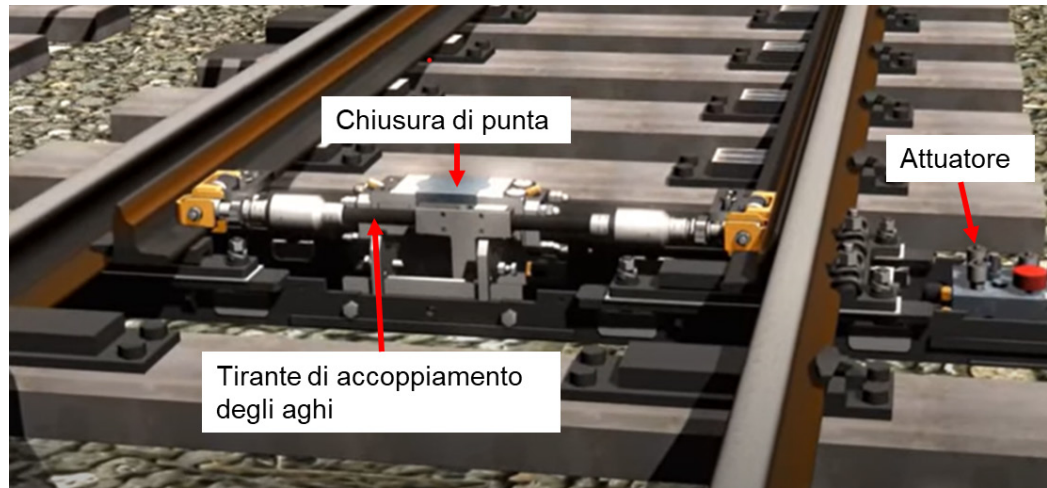


Figura 33: Immagine dettagliata di uno scambio Hydrostar, visto di punta, senza lamiera di protezione con i diversi componenti. L'attuatore stesso si trova al di fuori del canale di scartamento (fonte: Voestalpine, descrizione dei componenti: SISl).

3.1.8.1.3 Accertamenti

3.1.8.1.3.1 Scambio W387

Nello scambio W387 con percorrenza di calcio, la cassa di manovra e le linee di collegamento idraulico dei fermascambi sono andati distrutti a causa dell'assile deragliato (Figura 34). La chiusura stessa della punta e i fermascambi centrali sono stati divelti (Figura 41), per cui i due aghi non erano più fissati nelle rispettive posizioni previste.

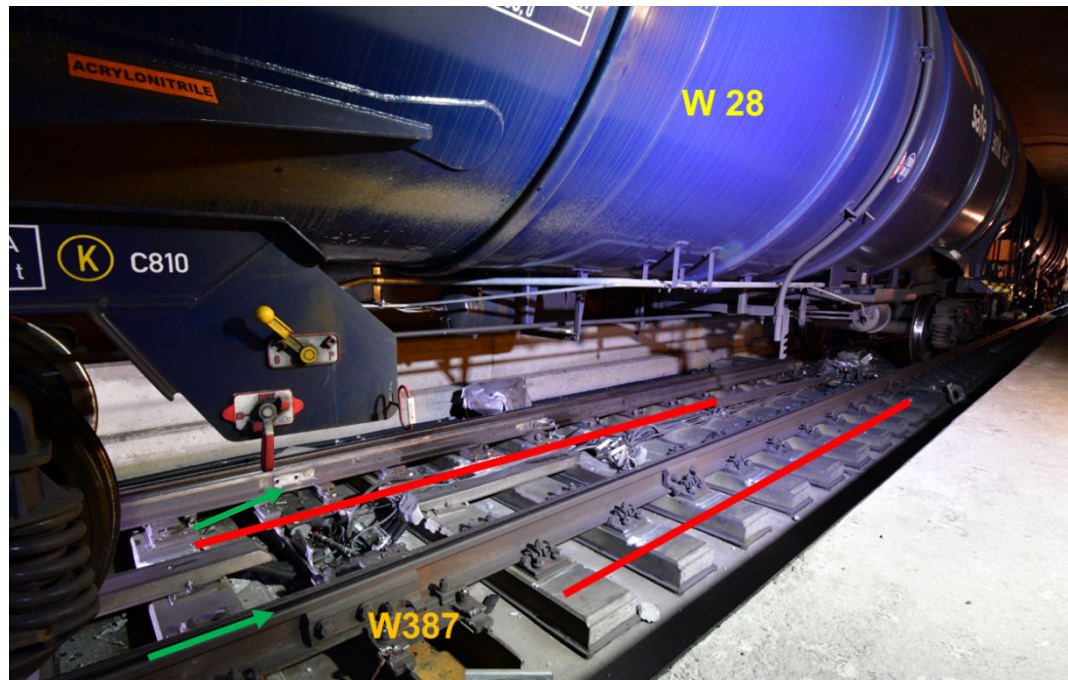


Figura 34: Danni allo scambio W387 sotto il carro 28. Fermascambi centrali e condotti idraulici distrutti. Linee rosse: posizione dell'assile deragliato.

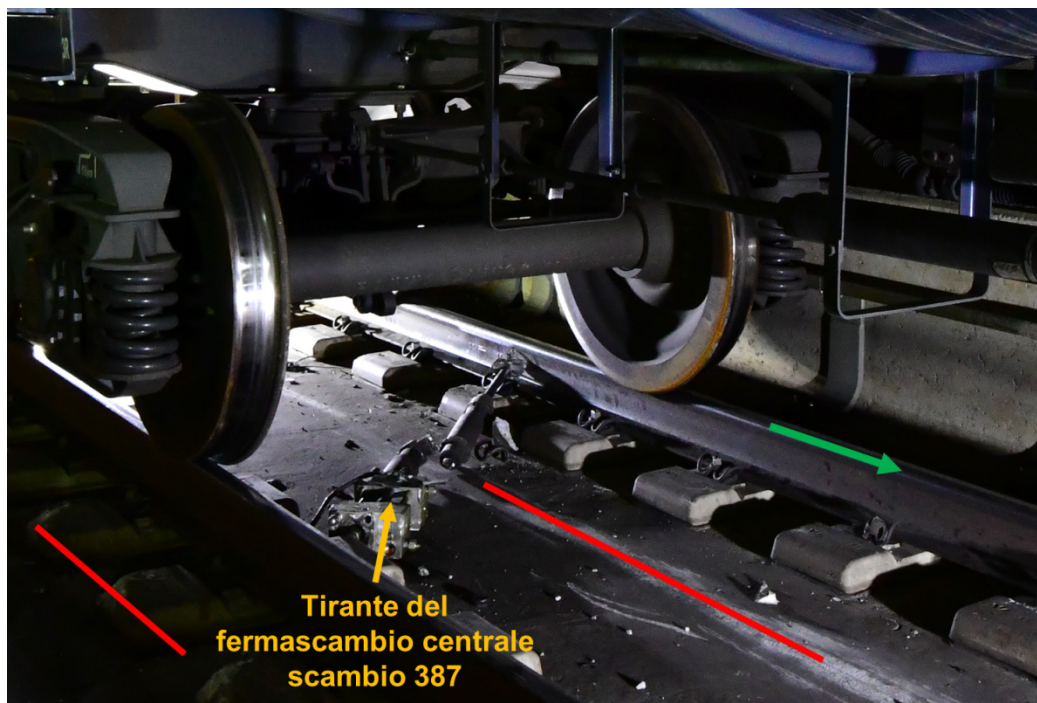


Figura 35: Un tirante di accoppiamento degli aghi di un fermascambio centrale del deviatore W387 è stato divolto e giaceva poco prima del successivo scambio W386. Linee rosse: posizione dell'assile deragliato.

3.1.8.1.3.2 Scambio W386

Lo scambio W386 con percorrenza di punta è andato completamente distrutto (Figura 36).

Come nello scambio percorso in precedenza, la ruota pendente verso il basso ha distrutto tutti i fermascambi e i condotti idraulici, strappando anche la chiusura di punta e i successivi fermascambi centrali (Figura 32, Figura 33). Gli aghi non venivano pertanto più mantenuti nelle loro posizioni regolari.

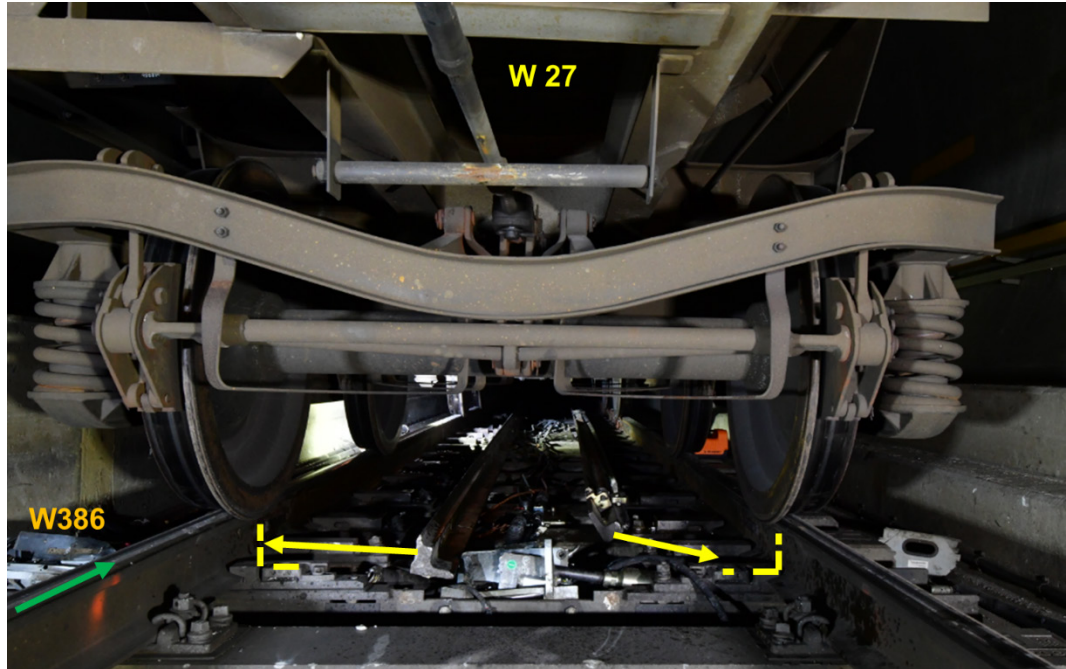


Figura 36: Danno alla punta dello scambio W386. Freccie gialle: normale posizione degli aghi (fonte: polizia cantonale TI, integrazione SISI).

3.1.8.1.3.3 Tratto di binario tra il km 47 e il km 40

Un frammento di ruota è stato scagliato contro una traversa biblocco in cemento armato all'altezza del km 47.1.



Figura 37: Danno alla traversa in cemento armato all'altezza del km 47.1 dovuto a un frammento di ruota staccatosi dall'assile 1 del carro 11.



Figura 38: Frammento di ruota staccatosi dall'assile 1 del carro 11.

A breve distanza dal punto in cui si è staccato il secondo frammento di ruota (Figura 20) sono visibili i segni di impatto sulla superficie di rotolamento della rotaia destra su una lunghezza di circa 150 m (Figura 39 e Figura 40).



Figura 39: Segno sulla superficie di rotolamento della rotaia destra in direzione di marcia (km 46.9–46.8).



Figura 40: Altro segno sulla superficie di rotolamento della rotaia di destra in direzione di marcia (km 46.9–46.8).

L'assile difettoso ha perso la guida sul binario in corrispondenza del km 46.7. La ruota sinistra è entrata in collisione con le traverse biblocco in cemento armato, danneggiandole sul lato interno per una lunghezza di circa 15 m (Figura 41). In seguito all'urto, a quel punto l'assile pendeva sotto il pavimento del carro di circa 45° verso destra (in direzione di marcia) rispetto alla posizione normale.



Figura 41: Traverse in cemento armato a destra e a sinistra del binario danneggiate dall'assile deragliato (km 46.7).

Dal km 46.60 l'assile pendeva a tal punto che il bordo della ruota sinistra ha lasciato segni di abrasione sul pavimento di cemento della galleria, pur non distruggendo nemmeno una delle balise ETCS posate nella massicciata. Le traverse in cemento armato, invece, risultavano danneggiate (Figura 42).



Figura 42: Segni di abrasione sul pavimento di cemento lasciati dal bordino della ruota sinistra dell'assile 1, carro 11. Danni su entrambi i lati delle traverse in cemento armato (km 46.60).

Dal km 46.5 il pavimento della galleria era cosparso dei frammenti delle traverse danneggiate (Figura 43).



Figura 43: Segni di abrasione provocati dal bordino strisciante sul pavimento della galleria e frammenti delle traverse di cemento distrutte (ca. km 46.5).

Tra il km 46 e il km 41 la maggior parte delle traverse biblocco in cemento armato presentavano lievi danni. Sul pavimento di cemento sono state trovate diverse

schegge delle suole dei freni. In questo tratto la ruota sinistra non è entrata in contatto con il pavimento di cemento (Figura 44).



Figura 44: L'immagine ripresa dalla cabina di guida del treno di spegnimento e salvataggio (TSS) all'altezza del km 41.1 mostra i lievi danni tra il km 46 e 41, qui sul lato destro delle traverse in cemento armato (cerchi rossi).

3.1.8.1.3.4 Stazione multifunzionale Faido

A differenza del binario di tratta, gli scambi della stazione multifunzionale di Faido poggiano su traverse monoblocco in cemento armato. La ruota sinistra deragliata ha urtato la prima traversa monoblocco dello scambio W387, danneggiando anche quelle successive (Figura 45). In seguito all'impatto violento l'assile deragliato di traverso si è ritrovato in posizione ancora più obliqua.



Figura 45: Evidenti segni dell'impatto sulla prima traversa monoblocco in cemento armato dello scambio W387.

Nel tratto compreso tra gli scambi W387 e W386 il binario è nuovamente provvisto, come il binario dei tratta, di traverse biblocco (Figura 46).

I segni lasciati dalla ruota sinistra sul pavimento di cemento sono notevolmente più larghi, per cui si desume che, dopo l'urto contro la traversa monoblocco dello scambio, l'assile sia finito in posizione ancora più obliqua (Figura 46). In questo tratto di binario, tra le traverse è stato rinvenuto un fermascambio centrale del deviatoio W387.



Figura 46: Ampi segni di abrasione sul pavimento in cemento tra gli scambi W387 e W386 causati dall'assile 1 deragliato del carro 11. Tra le traverse, il fermascambio divolto del deviatoio W387.

Anche sul binario di raccordo alla canna est, dopo lo scambio W386 le rotaie poggiano nuovamente su traverse in cemento armato biblocco. In corrispondenza del passaggio dalle traverse monoblocco a quelle biblocco, la rotaia destra del binario 7000 è stata spinta verso destra e divelta dal sistema di fissaggio (Figura 48).

La controrotaia sul lato sinistro del cuore a punta mobile dello scambio W386 è stata distrutta.

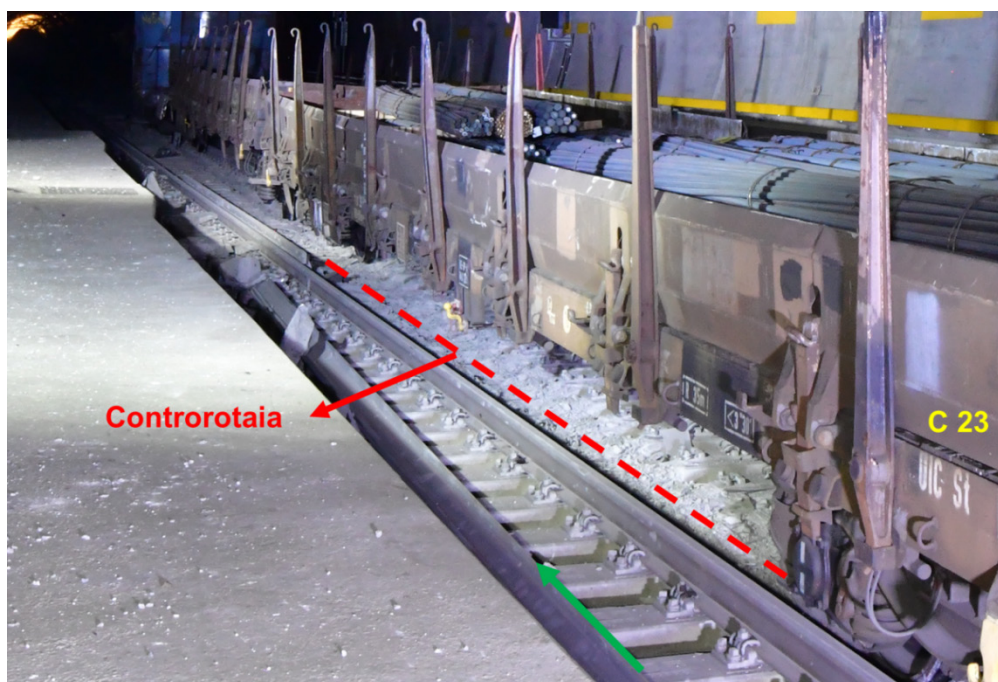


Figura 47: Controrotaia divelta sul lato sinistro del cuore a punta mobile dello scambio W386 (fonte: polizia cantonale TI, integrazione SISI).

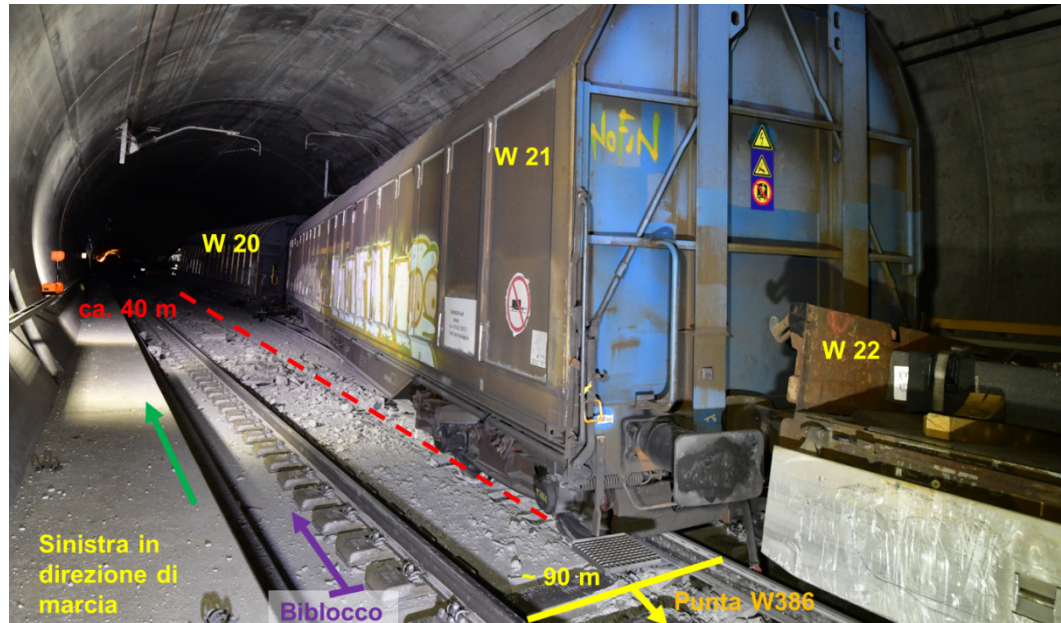


Figura 48: Binario distrutto a valle dello scambio W386. La rotaia destra, in direzione di marcia, e le traverse biblocco in cemento armato sono state divelte, finendo sotto i carri deragliati. La rotaia era sotto il carro 21 sviato. (Fonte: polizia cantonale TI, integrazione SISI).

3.1.8.2 Apparato centrale e tecnica di comando e controllo.

3.1.8.2.1 Descrizione

La Galleria di base del San Gottardo (GBG) è provvista di un apparato centrale di tipo Elektra 2 con sistema di segnalamento in cabina di guida ETCS Level 2. La GBG è gestita e monitorata dal sistema di comando Ittis del Centro d'esercizio sud di Pollegio (TI). Ittis è un sistema di telecomando delle centrali di comando e non ha una funzione rilevante per la sicurezza. Le registrazioni del sistema Ittis e della RBC sono state messe a disposizione del SISI.

Per garantire un'elevata disponibilità di tratta, sugli impianti gestiti tramite ETCS livello 2 su tratte a gamma di velocità estesa, ci sono dei conta-assi⁷ (rotaia sinistra e rotaia destra) ridondanti. Fino a quando non viene rivelata una differenza fra i conta-assi posizionati uno di fronte all'altro la tratta rimane aperta. I guasti di "valenza" (figura 49) vengono segnalati quando si verifica una differenza di valore. Se dopo il passaggio di un treno si verifica un guasto di "valenza" il convoglio può proseguire normalmente. Un guasto di "valenza" non ha nessun influsso sul treno che segue e non genera l'intervento da parte del capo movimento.

Quando le sezioni controllate dai conta-assi rimangono occupate, le sezioni vengono segnalate in rosso, ma questo non genera un annuncio di errore. Il compito di sicurezza della centrale di comando è di impedire l'accesso ad altri treni in queste sezioni. Il capomovimento riceve un annuncio solo quando il prossimo treno si presenta per percorrere questa tratta.

⁷ Conta-assi ridondante: Secondo manuale SBB– I-30060, particolarità degli impianti ETCS livello 2.

3.1.8.2.2 Accertamenti sulla tecnica di comando e controllo Il percorso del treno 45016 attraverso la Galleria di base del San Gottardo è stato automaticamente impostato dalla tecnica di comando e controllo sul binario 7000.

3.1.8.2.3 Accertamenti sugli scambi sul monitor di Ittis

Sullo scambio W387 (primo scambio della stazione multifunzionale di Faido viaggiando verso nord), alle ore 12:48:11 è stata segnalata un'anomalia (perdita della posizione di controllo). Un secondo dopo, anche il sistema di monitoraggio dello scambio W386 ha registrato la medesima segnalazione.

3.1.8.2.4 Accertamenti sui conta-assi e sul monitor di Ittis

Sul monitor di Ittis, dopo il passaggio del treno i tratti 7705–7709 presentavano anomalie nella valenza dei conta-assi⁸ (cerchi di colore magenta) (Figura 49), dovute al danneggiamento dei cavi dei conta-assi (Figura 50) da parte dell'assile 1 deragliato del carro 11. I tratti 7711 e 7713 sono rimasti occupati.

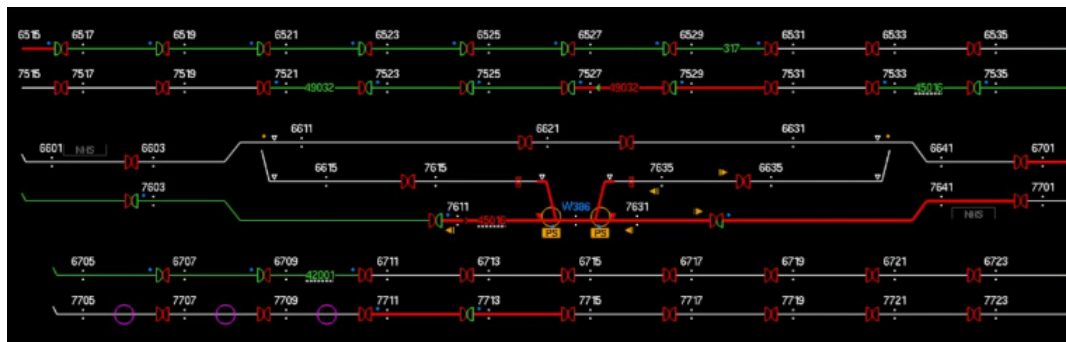


Figura 49: Estratto della registrazione del sistema Ittis:

i cerchi di colore magenta sui binari 7705, 7707 e 7709 segnalano delle anomalie nella valenza dei conta-assi; a destra di essi, nei tratti 7711 e 7713, i binari rimangono occupati (linea rossa). Uno stato di occupazione può anche verificarsi quando i due conta-assi sono disturbati.

I cerchi arancioni, l'occupazione di entrambi i rami di deviazione e i simboli "PS" (posizione dello scambio) al centro dell'immagine indicano una perdita di posizione finale degli scambi W386 e W387.

⁸ Si ha un'anomalia nella valenza quando il numero di assi contati sulla rotaia sinistra non corrisponde a quello contato sulla rotaia destra.



Figura 50: Cavi danneggiati del conta-assi del tratto 7707.

L'involucro esterno del cablaggio del conta-assi del tratto 7705 risultava solo leggermente danneggiato dal bordino dell'assile 1 del carro 11 (Figura 51). I cavi non hanno subito danni.



Figura 51: Involucro del cablaggio del conta-assi leggermente segnato, senza danni ai cavi (tratto 7705).

Un'anomalia nella valenza dei conta-assi successiva al passaggio di un treno non ha alcun influsso sulla «Movement Authority» di quel convoglio.

3.1.8.3 Videosorveglianza della stazione multifunzionale di Faido

3.1.8.3.1 Descrizione

Le fermate d'emergenza della stazione multifunzionale di Faido e Sedrun (figura nr.2) sono videosorvegliate. La videosorveglianza serve in particolare per la gestione dell'evacuazione delle persone in caso di emergenza. Il sistema video è sempre in funzione, ma viene utilizzato attivamente da parte di un collaboratore di intervento della centrale operativa solo in caso di emergenza.

La registrazione del passaggio del treno 45016 è stata messa a disposizione del SISl da parte di SBBI.

3.1.8.3.2 Accertamenti

La videoregistrazione mostra la presenza di scintille sotto l'assile 1 del carro 11 al passaggio del treno (Figura 52).



Figura 52: Passaggio del treno alla SMF di Faido (ca. km 40.8). Formazione di scintille dai triangoli del freno dell'assile 1, carro 11. Si vede bene anche la cassa del carro 11 più inclinata da un lato (fonte: immagine della videosorveglianza della SMF di Faido di SBBI).

Successivamente al passaggio del treno il binario presentava soltanto danni di minima entità. Sul pavimento di cemento era visibile qualche segno lasciato dal bordino o dai triangoli del freno (Figura 53).



Figura 53: Stato dei binari dopo il passaggio del treno alla SMF di Faido (ca. km 40.8). I cerchi rossi indicano i segni lasciati sul pavimento di cemento. (Fonte: immagine della videosorveglianza della SMF di Faido di SBB).

3.1.8.4 Impianti di controllo dei treni

3.1.8.4.1 Descrizione

Sulla rete ferroviaria svizzera a scartamento normale sono presenti molteplici sistemi di diversa natura appartenenti agli impianti di controllo dei treni (ICT). Il loro compito è effettuare misurazioni sui treni in transito, reagire in caso di anomalie con messaggi d'allarme e quindi fornire un contributo importante alla sicurezza del traffico ferroviario.

Tra Chiasso e il portale sud della Galleria di base del San Gottardo sono installati due punti di misurazione ICT: il primo a Mendrisio (HFO–RLC–PAO–DED) e il secondo a Claro (HFO–RLC–PAO).

I due sistemi seguenti hanno una particolare rilevanza nell'ambito dell'evento qui esaminato:

- impianto per la localizzazione delle boccole surriscaldate / dei freni bloccati (HFO)
- checkpoint del carico per ruota (RLC)

La descrizione dettagliata dei sistemi ICT con i relativi valori di guardia e di allarme è riportata all'allegato 4.

3.1.8.4.2 Analisi dei dati

I dati richiesti ai fini dell'inchiesta sono stati messi a disposizione del SISI. I sistemi ICT funzionavano regolarmente.

Dall'analisi dei dati registrati dagli ICT è emerso quanto segue.

- Note generali

Il SISI ha provveduto ad analizzare i dati delle corse del carro 466-2 sul territorio svizzero tra il 4 agosto 2022 e il 23 dicembre 2022, registrati da vari impianti RLC e HFO. Durante quel periodo è stato rilevato un valore massimo

relativo al «rapporto fra carichi sulle ruote» sinistra-destra pari a 1.2:1 (soglia d'allarme $\geq 1.7:1$). Dal 4 agosto 2022 al 23 dicembre 2022 non sono scattati allarmi al passaggio del carro 466-2 in nessun impianto, né RLC né HFO.

Tra il 23 dicembre 2022 e il 3 agosto 2023 il carro 466-2 (carro 11) non ha circolato in Svizzera. Precedentemente il suddetto carro era stato rilevato un'ultima volta dal sistema ICT in data 23 dicembre 2022, in transito da sud a nord.

Il 3 agosto 2023, poco dopo le ore 23, il sistema ICT registrava l'ingresso del carro in Svizzera in prossimità di Gellert (Basilea). Il 4 agosto 2023, alle ore 03:19, il carro transitava per l'impianto di controllo ICT di Claro, per poi proseguire per l'Italia. Durante quella corsa non si sono riscontrate irregolarità.

Il 10 agosto 2023, alle ore 09:53, l'impianto di controllo ICT di Mendrisio registrava il rientro del carro 466-2 dall'Italia quale undicesimo carro in composizione al treno merci 45016. Alle ore 12:15 il treno passava per l'impianto ICT di Claro.

- Checkpoint del carico per ruota (RLC)

Al passaggio per i due punti di misurazione RLC di Mendrisio e Claro, rispettivamente alle ore 09:53 e 12:15 del 10 agosto 2023, sull'assile anteriore del carro 11 si riscontrava un rapporto fra i carichi assiali tra la ruota sinistra e quella destra di 1.01:1 (valore d'allarme d'intervenzione $\geq 1.7:1$).

Al passaggio per il punto di misurazione RLC di Claro (allegato 2, Figura 93), sull'assile anteriore del carro 11 si misurava una forza dinamica alla ruota $< 18\text{ t}$ (valore d'allarme d'intervenzione «difetto alle ruote forza dinamica» $\geq 40\text{ t}$).

- Impianto per la localizzazione delle boccole surriscaldate / dei freni bloccati (HFO)

Al passaggio per questi due punti di misurazione nessun carro del treno 45016 aveva fatto scattare un allarme HFO (allegato 3, figura 95).

3.1.9 Regolamento VPI

Le linee guida VPI sono pubblicate dalle associazioni dei detentori di carri privati VPI Germania, V.P.I. Austria e VAP Svizzera. Trattano la manutenzione dei carri merci e dei relativi componenti e forniscono raccomandazioni in merito alle tempistiche, alla tipologia e all'entità degli interventi di manutenzione. Le quali comprendono tra l'altro i seguenti moduli:

VPI-01 Manutenzione di carri merci, Sezione generale, scadenze delle revisioni
VPI-04 Manutenzione di carri merci, Sale montate

VPI-09 Manutenzione di carri merci, Prove non distruttive

I punti principali relativi alla manutenzione delle sale montate, che hanno un nesso con questo incidente, sono riepilogati qui di seguito:

Il livello di manutenzione 2 (IS2) delle sale montate prevede una riprofilazione delle sale, una volta smontate, con controllo non distruttivo (CND) (IS1), più un'ispezione delle boccole e un CND approfondito.

Le sale montate del carro 466-2 (carro 11) sono classificate secondo VPI 04 nel gruppo C (percorrenza annua $\geq 50\ 000 - < 80\ 000\text{ km}$).

Una volta raggiunta la percorrenza massima (660 000 km), tuttavia non oltre il superamento della durata massima di installazione previsto dal rispettivo gruppo di

classificazione della sala (8 anni), le sale devono essere smontate e sottoposte a manutenzione (VPI-04, allegato 12).

3.1.10 Sistema di gestione della sicurezza delle imprese di trasporto ferroviario

3.1.10.1 Note generali

L'impresa di trasporto ferroviario (ITF) FFS Cargo SA dispone di un sistema di gestione della sicurezza (SMS).

In relazione all'incidente sono stati esaminati i seguenti capitoli del sistema di gestione della sicurezza:

5.6.2 Eseguire il servizio di trasporto, manuale per il servizio tecnico dei veicoli.

Il manuale per il servizio tecnico dei veicoli è la base di riferimento per la produzione e descrive lo standard di qualità universale.

Qui di seguito vengono riepilogati soltanto gli elementi correlati all'incidente in questione.

L'ispezione tecnica dei carri viene effettuata da personale qualificato (CTC). Essa consiste nell'esaminare la sicurezza in esercizio e l'idoneità alla circolazione dei carri, registrare eventuali difetti o loro indizi riconoscibili secondo l'allegato 9 CUU (catalogo delle anomalie) e adottare le misure necessarie.

Ispezione tecnica dei carri - compiti del CTC

- Controllo di tutti i carri merci dal punto di vista dello stato tecnico e dell'operatività (incl. ispezione tecnica dei freni e prova dei freni)
- Controllo tecnico dei carri merci e dei loro carichi come da catalogo di verifica CUU allegato 9 appendice 5.

Misure correttive in caso di irregolarità del carro e del carico

Qualora riscontri anomalie e danni al carro / carico, il CTC adotta le misure di riparazione e/o di miglioramento / spostamento del carico necessarie. I danni riscontrati devono essere contrassegnati con una croce e sui carri vanno applicati gli adesivi opportuni.

Tutte queste operazioni devono essere documentate, al fine di poter trasmettere le informazioni ai detentori dei carri e ai clienti.

Documentazione di irregolarità e danni

I CTC hanno a disposizione il sistema elettronico «SCHEMA» per la registrazione delle irregolarità. Le eventuali segnalazioni vanno registrate secondo l'istruzione di lavoro «Inserimento nella banca dati SCHEMA».

3.1.10.2 Preparazione del treno a Chiasso

Secondo la lista di controllo del treno 45016 messa a disposizione del SISI, il treno era stato sottoposto a ispezione tecnica da parte di un CTC a Chiasso.

La preparazione del treno è avvenuta in cinque fasi. L'undicesimo carro (carro 466-2) è stato ispezionato nella prima fase (in tutto 13 carri) (allegato 9, Figura 102).

Una volta posizionati tutti i 30 carri, è stata effettuata una prova dei freni.

Successivamente veniva comunicato dalla competente centrale di comando di Cargo di Chiasso che il treno 45016 aveva dato esito di «controllo tecnico e prova freno completa». Il protocollo è stato firmato dal CTC (allegato 9, figura 102). La centrale di comando ha registrato nel rapporto giornaliero la delibera del treno 45016 e ha riportato la delibera nel sistema CIS.

3.1.11 Manutenzione dei carri e delle sale montate

3.1.11.1 Carro 466-2 (carro 11)

Revisione

Il carro è stato sottoposto a una revisione G 4.2 nel gennaio 2018. Durante l'intervento si è proceduto allo smontaggio, alla revisione e al rimontaggio dei quattro assili.

Per i lavori di revisione la TWA si basa esclusivamente sulle linee guida VPI.

Riparazioni

Tra gennaio 2018 e agosto 2023 il carro è stato più volte in diverse officine di manutenzione per varie riparazioni. I verbali di reimmissione in servizio sono stati messi a disposizione del SISl.

L'unica segnalazione registrata risale al 25 luglio 2022 e riguarda un'anomalia ai freni. Nel verbale di reimmissione in servizio risulta quanto segue:

L'impianto frenante è stato testato e controllato secondo le norme vigenti. Il sistema è perfettamente funzionante.

Dalla documentazione del manutentore messa a disposizione non risultano indicazioni di misure correttive o preventive sugli assili del carro 11.

L'ultima volta che il carro è stato in un'officina di manutenzione è stata il 19 luglio 2023 in Svezia per la riparazione di un portellone scorrevole. Nel verbale di autorizzazione risulta inoltre che sono state sostituite anche due coppie di suole dei freni LL, senza tuttavia specificare su quale assile. Dopo la sostituzione delle suole è stata effettuata una prova dei freni.

3.1.11.2 Assile 1 (81987)

L'ultima IS2 della sala montata con la ruota fratturata è stata effettuata in Svezia il 26.10.2017 presso un'officina di manutenzione certificata. Dall'ultima IS2 la sala ha percorso all'incirca 173 000 km.

Dalla visione dei verbali di manutenzione IS2 è emerso quanto segue:

- dopo la riprofilazione il diametro della sala era di 862 mm;
- l'esame a ultrasuoni delle due ruote non ha evidenziato nulla di rilevante;
- le misurazioni delle tensioni residue sulle due corone delle ruote hanno restituito valori di 171 e 198 MPa (valore ammissibile secondo VPI-09: da -350 a +400 MPa).

3.2 Esposizione dei fatti

3.2.1 Dinamica del deragliamento al cambio corsia di Faido

Alla luce delle prove raccolte sull'infrastruttura e sui carri, la dinamica del deragliamento a partire dallo scambio W386 in corrispondenza del cambio corsia della stazione multifunzionale di Faido può essere ricostruita come segue:

L'assile 1 deragliato con la ruota fratturata destra in direzione di marcia pendeva all'indietro inclinato di circa 45°C sotto il carro 11 e distruggeva l'intera cassa di manovra dello scambio W386 (Figura 54, Figura 55).

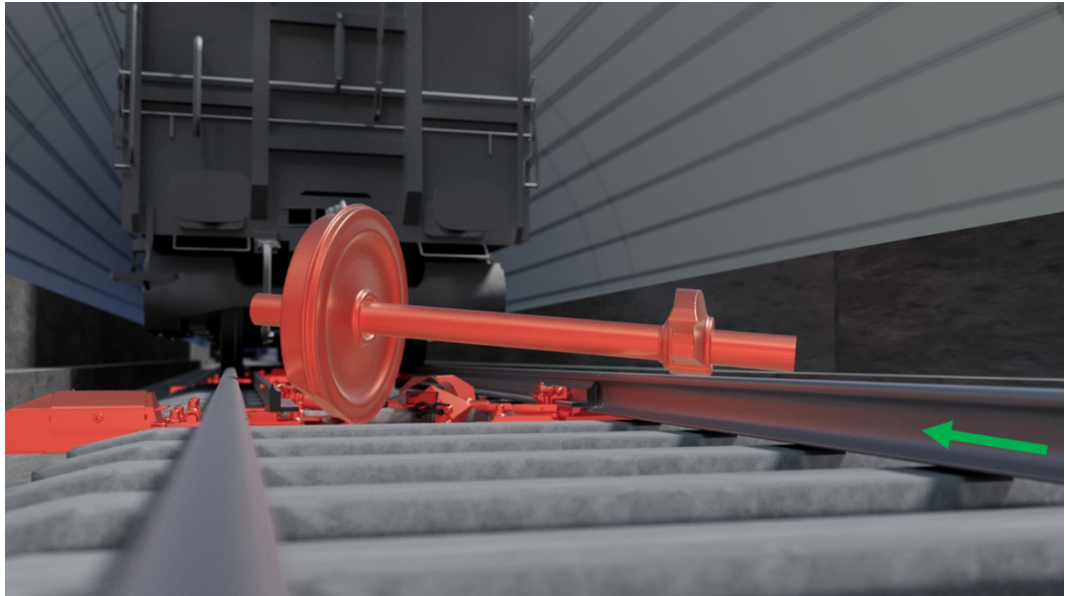


Figura 54: Distruzione della chiusura di punta dello scambio W386 da parte dell'assile deragliato.

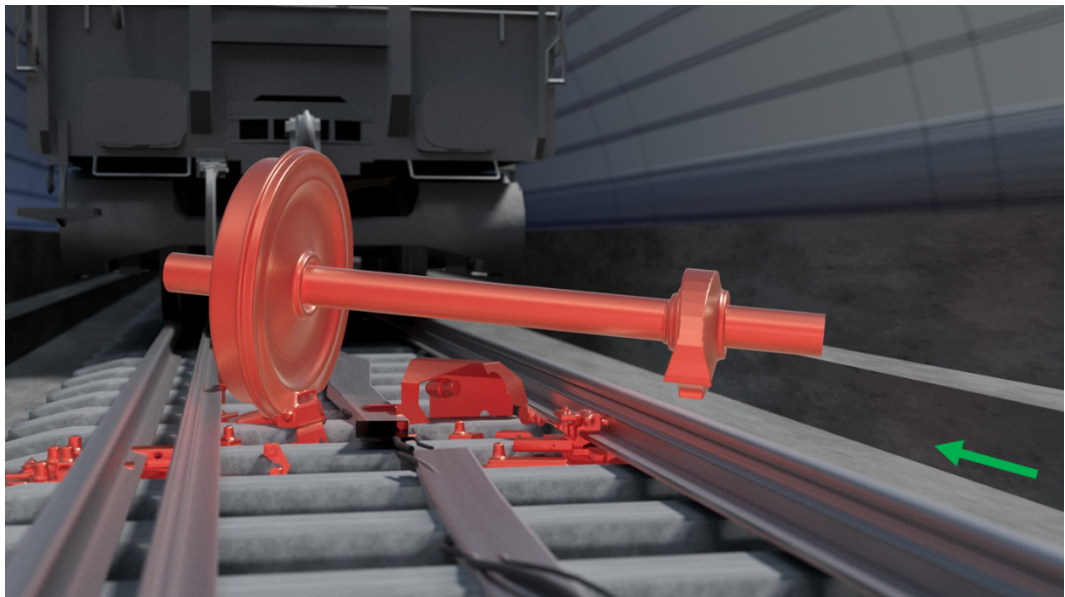


Figura 55: Distruzione del fermascambio centrale e dei condotti idraulici W386 da parte dell'assile deragliato.

Dopo circa 70 m, in prossimità del cuore, veniva distrutta anche la controrotaia (Figura 47).

Nonostante lo scambio W386 fosse distrutto, gli assili 2–4 del carro 11, i successivi carri 12 e 13 (Figura 56) e il primo assile del carro 14 hanno attraversato lo scambio ancora in linea retta per poi immettersi nel binario 7000 (Figura 57).

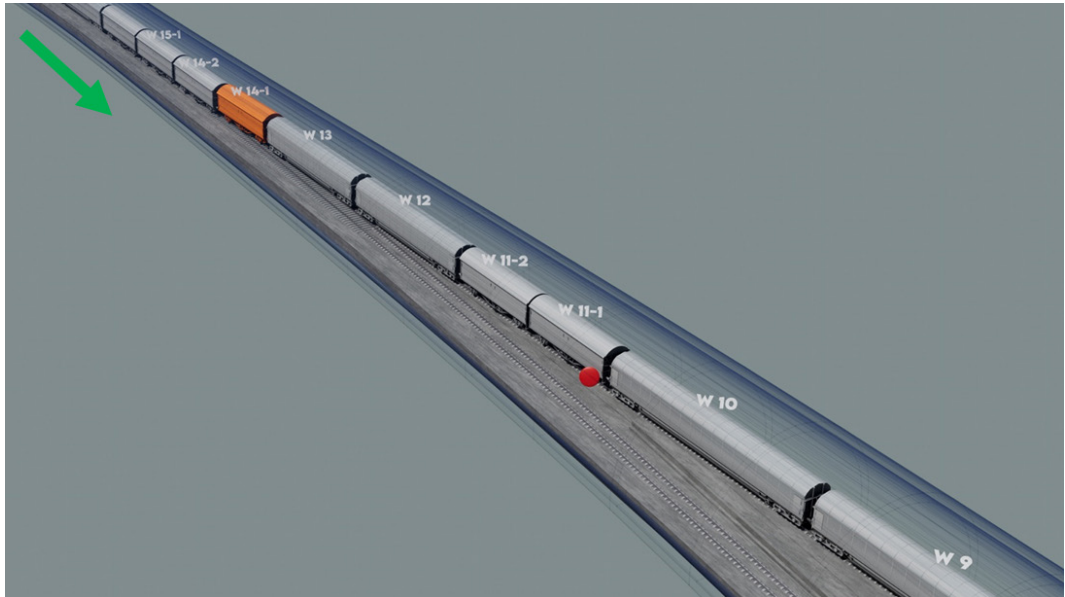


Figura 56: Rappresentazione della corsa del treno in prossimità dello scambio W386 della stazione multifunzionale di Faido. Punto rosso: assile 1 deragliato del carro 11. Carro arancione: carro 14.

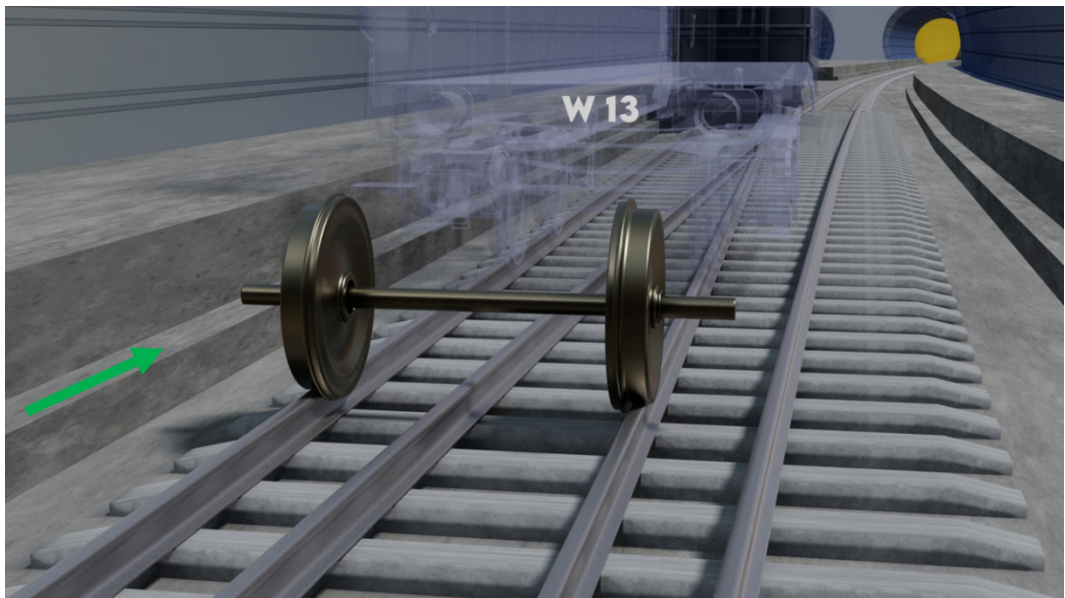


Figura 57: carro 14, assile 1.

L'assile 2 del carro 14 è stato deviato verso il binario di raccordo alla canna est (binario 6000).

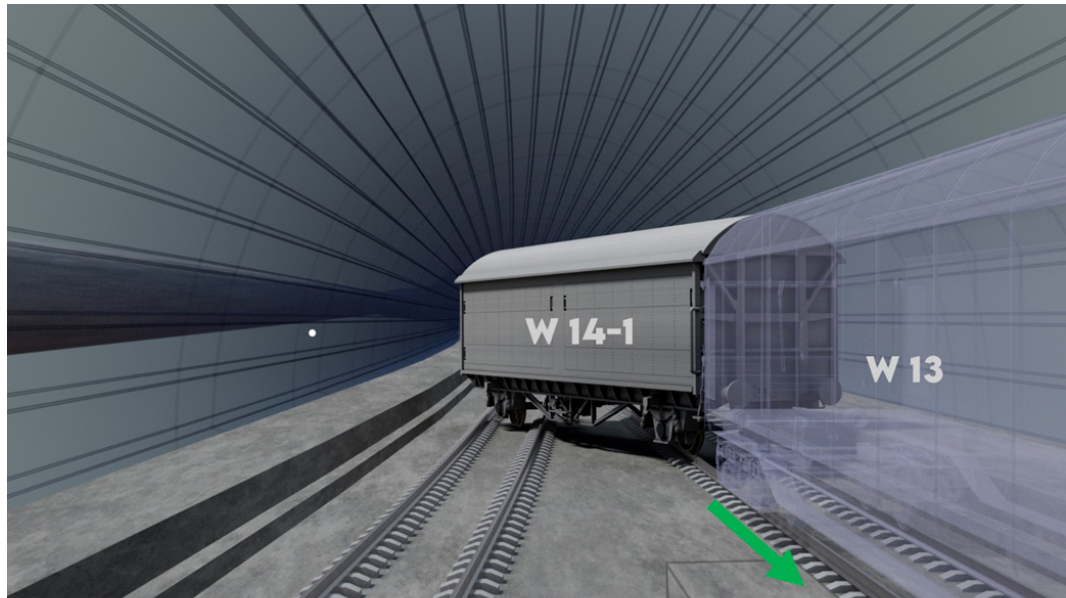


Figura 58: Carro 13 sul binario 7000 e, dietro, il carro 14-1 deviato, con l'assile anteriore anch'esso sul binario 7000 e quello posteriore sul binario di raccordo.

Successivamente la prima metà del carro 14 è scivolata di traverso sulla mensola centrale (Figura 9), finché non è andata a sbattere e a distruggersi completamente contro la parete trasversale tra il binario 7000 e il binario di raccordo (Figura 9). La seconda parte del carro 14, invece, ha proseguito lungo il binario di raccordo alla canna est (binario 6000) e ha abbattuto la porta di cambio corsia, per poi fermarsi ruotato di circa 90°. L'assile 3 si trovava già a valle della porta di cambio corsia (Figura 11), mentre l'assile 4 era ancora a monte della porta (Figura 10).

In seguito al sollevamento della prima parte del carro 14, che a quel punto scivolava di traverso sulla mensola centrale rialzata, anche il carro 13 antistante è stato sollevato su un lato, il che ha successivamente comportato lo svio, la separazione del treno e il ribaltamento nella canna ovest, sul binario 7000. Il carro 13 si è fermato circa 150 m dopo la parete trasversale tra le due gallerie (Figura 8). La dinamica sviluppatasi ha fatto deragliare anche il carro 12 (Figura 7).

Il primo assile del carro 15 non presentava danni al bordini riconducibili a un contatto con il pavimento di cemento, il che significa che il carro è deragliato poco prima di capovolgersi (Figura 59).

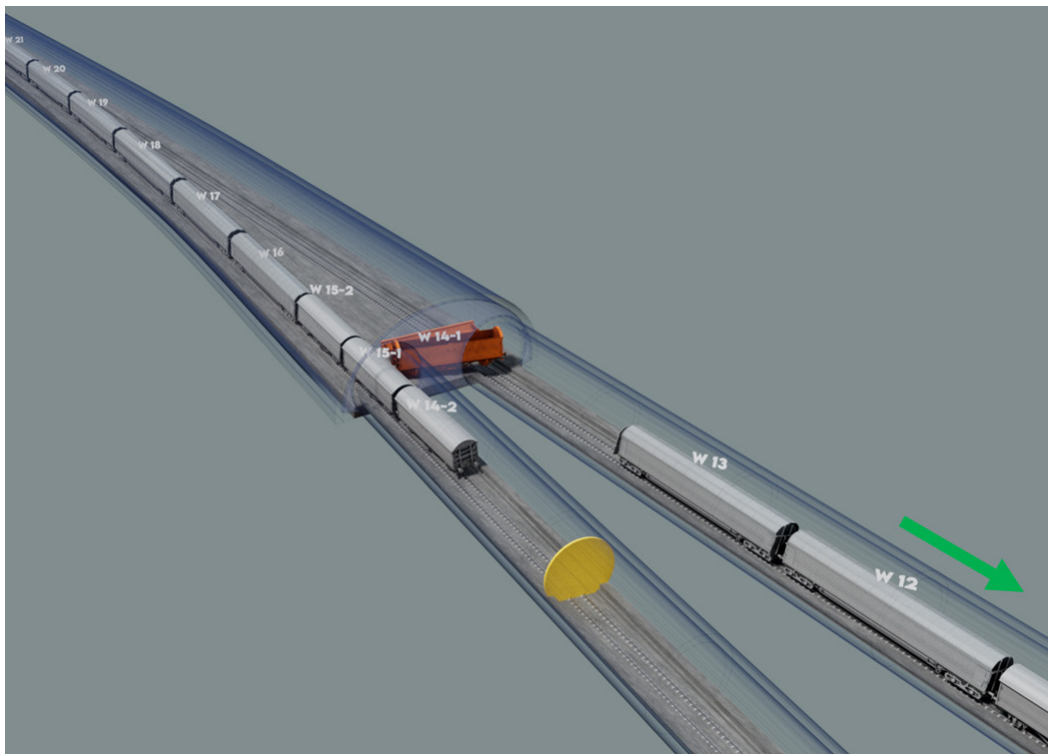


Figura 59: Situazione poco prima dell'arresto dei carri.

I carri da 14-2 a 16 sono deragliati e si trovavano sul binario di raccordo in direzione della canna est, binario 6000 (Figura 60).

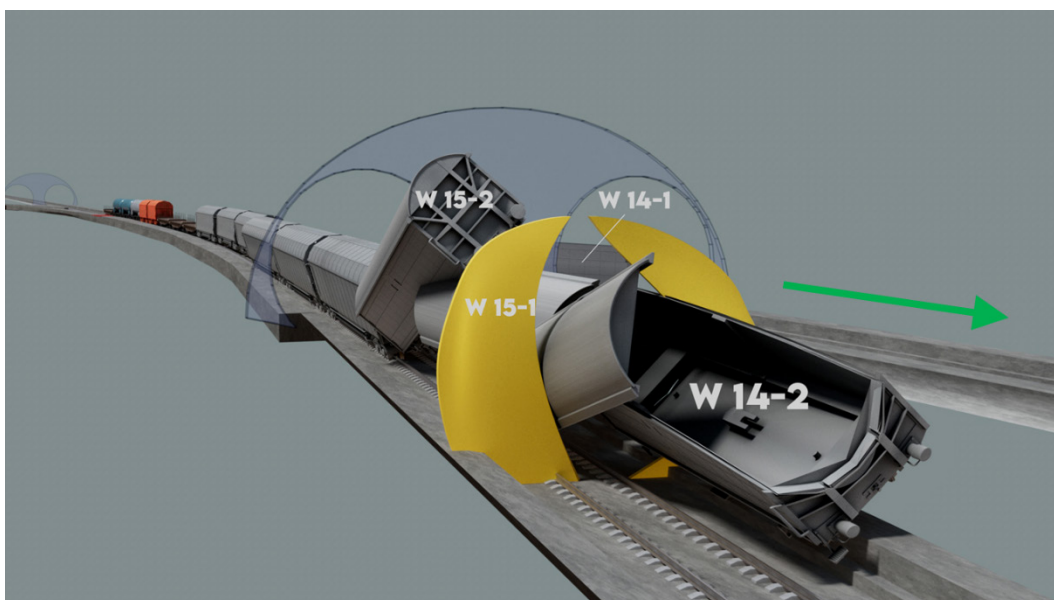


Figura 60: Situazione dopo l'arresto dei carri.

I carri da 17 a 26 sono deragliati distruggendo completamente il binario di raccordo a valle dello scambio W386 (Figura 48).

4 Analisi

4.1 Ruoli e mansioni

4.1.1 Impresa ferroviaria o imprese ferroviarie e/o gestore o gestori dell'infrastruttura

Il «Contratto uniforme d'utilizzazione dei carri merci» (CUU) sancisce le condizioni di cessione dei carri merci ai fini del loro utilizzo da parte delle ITF quale mezzo di trasporto nel traffico merci ferroviario nazionale e internazionale. In esso sono disciplinati i diritti e gli obblighi del detentore del carro e delle ITF.

L'allegato 9 del CUU, il cosiddetto «catalogo delle anomalie», stabilisce e descrive all'appendice 1 lo stato tecnico dei carri merci oggetto di scambio che dev'essere obbligatoriamente rispettato ai fini della loro cessione, nella misura garantita da un'apposita ispezione tecnica.

Per anomalie s'intende uno scostamento rispetto alle caratteristiche qualitative descritte nel catalogo di verificatale per cui il carro o il treno non soddisfa i requisiti stabiliti.

Tra i punti elencati, con le rispettive misure da adottare, figurano i danni al rodiggio, come il profilo della ruota, e i danni alle ruote, ad es. sfaccettature, cricche e surriscaldamenti.

Alla stazione di Bellinzona, con l'intervento del CTC si è proceduto al disinserimento dei freni del carro 14 (carro 579-2) e alla compilazione mediante tablet di un verbale di danno.

Il verbale di danno riporta quanto segue:

Come descrizione del danno, ai sensi dell'allegato 9 del CUU, è stato indicato il codice 1.2.2 «Surriscaldamento dovuto alla frenatura». I freni del carro sono stati disinseriti. Sul carro sono stati applicati i moduli «Modello K» e «R1». L'anomalia ai freni del carro 14 (carro 579-2) è stata pertanto eliminata e il carro contrassegnato correttamente come previsto all'allegato 9 del CUU.

4.1.2 Soggetto responsabile della manutenzione

⁹Conformemente alla direttiva (UE) 2016/798¹⁰ il sistema di manutenzione ECM è composto dalle seguenti quattro funzioni:

- 1 una funzione di gestione, per garantire la supervisione e il coordinamento delle funzioni di manutenzione di cui ai numeri 2–4 e assicurare le condizioni di sicurezza del veicolo nel sistema ferroviario;
- 2 una funzione di sviluppo della manutenzione, responsabile della gestione della documentazione relativa alla manutenzione, ivi compresa la gestione della configurazione, sulla base dei dati di progetto e operativi, nonché delle prestazioni e dell'esperienza maturata;
- 3 la funzione di gestione della manutenzione della flotta, per gestire la rimozione dall'attività del veicolo che deve essere sottoposto a manutenzione e il suo successivo ritorno in esercizio;

⁹ ECM: Entity in Charge of Maintenance (ente responsabile della manutenzione).

¹⁰ Direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio dell'11 maggio 2016 sulla sicurezza delle ferrovie.

- 4 una funzione di esecuzione della manutenzione, per eseguire la necessaria manutenzione tecnica di un veicolo o di parti di esso, ivi compresa la documentazione relativa alla reimmissione in servizio.

Le funzioni ECM 1–3 sono svolte dalla società TRANSWAGGON AG di Zugo.

La funzione 4 (esecuzione della manutenzione) è svolta da diverse officine legate a Transwaggon da un rapporto contrattuale.

Le ispezioni aventi un nesso rilevante con la manutenzione delle sale sono già state descritte in vari capitoli del presente rapporto.

Poiché l'evento in oggetto non è stato causato da una lacuna nell'esecuzione della manutenzione delle sale, il SISI rinuncia a effettuare ulteriori accertamenti in merito al sistema ECM.

Visto che il tipo di sala in questione era già in esercizio prima dell'entrata in vigore dei nuovi processi di omologazione, questi ultimi non vengono presi in considerazione nel presente rapporto.

4.1.3 Analisi della registrazione dei dati

4.1.3.1 Dati relativi alla corsa del treno 45076

Dall'analisi dei dati relativi alla corsa è emerso quanto segue:

- tra il portale sud della galleria e la stazione multifunzionale di Faido il treno procedeva a una velocità relativamente costante di 90 km/h ($v_{teorica}$);
- alle ore 12:50:01, ovvero 446 m / 28 s prima del punto di arresto, il sistema ETCS Level 2 attivava il passaggio dalla modalità d'esercizio «Full Supervision» alla modalità «Trip» (frenata d'emergenza in seguito alla revoca della «Movement Authority»);
- alle ore 12:50:02, circa 412 m prima del punto di arresto, veniva scaricata la condotta dell'aria principale;
- alle ore 12:50:13, a una velocità di 68 km/h, il macchinista azionava il rubinetto di comando del freno (questa operazione non ha tuttavia avuto alcun effetto, dal momento che la condotta dell'aria principale era già stata svuotata);
- alle ore 12:50:29 avveniva l'arresto della locomotiva.

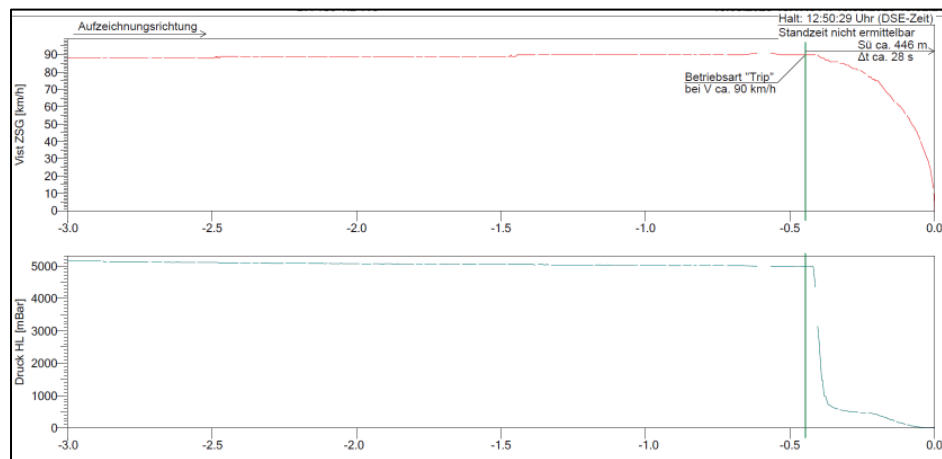


Figura 61: Rappresentazione grafica dei dati della corsa. In rosso: grafico velocità-distanza. In verde: grafico pressione condotta principale-distanza (HL: condotta principale); (0.5 = 500 m).

Dall'analisi dei dati della corsa e quelli della centrale di comando si nota che fra i due c'è una differenza di tempo, che è comunque irrilevante per questo evento.

4.1.3.2 Radio Bloc Center (RBC)

Dall'analisi dei dati RBC tra le ore 12:47 e le ore 12:50 è emerso quanto segue:

- il treno 45016 viaggiava in modalità «Full Supervision» (FS) con «Movement Authority» (MA) e $v_{\max}$ 95 km/h;
- lo scambio W387 percorso di calcio (Figura 30) segnalava una perdita di posizione finale, un rilevamento di percorrenza errata e una perdita di connessione al sistema di monitoraggio dello scambio;
- di conseguenza, dall'apparato centrale veniva attivata una fermata d'emergenza, con revoca della MA per il treno 45016;
- l'RBC inviava al treno una UES (Unconditional Emergency Stop = «TRIP»), a cui ha fatto seguito una frenata d'emergenza;
- il macchinista confermava all'RBC la UES «V 95 km/h su Trip».

4.1.3.3 Scambio Hydrostar – perdita dei fermascambi in seguito a danneggiamento

Nella configurazione di questa tipologia di scambi Hydrostar, i fermascambi e i tiranti di accoppiamento degli aghi, che fungono da back-up per le chiusure di punta, sono posizionati sopra lo spigolo superiore della traversa (Figura 62).



Figura 62: Scambio Hydrostar, chiusura di punta.

Per contro, negli scambi tradizionali con chiusura a nottolino (allegato 10, Figura 103), il fermascambio e i dispositivi di back-up (tiranti di controllo degli aghi) si trovano sotto lo spigolo superiore della traversa.

Nello scambio W387 la chiusura di punta e i tiranti di accoppiamento degli aghi sono stati completamente divelti dall'assile deragliato, che li ha trascinati per svariati metri (

Figura 35).

L'assile 1 del carro 11 ha distrutto anche tutti i fermascambi del deviatoio W386 (Figura 54 e Figura 55), impedendo il mantenimento degli aghi e del cuore dello scambio nella posizione corretta.

4.1.3.4 Impianti di controllo dei treni

Durante il passaggio del treno 45016 sugli impianti di controllo di Claro non si sono registrate né boccole surriscaldate né freno bloccato (HFO) né irregolarità rispetto a carichi asimmetrici, sovraccarichi, o ovalizzazioni delle ruote (RLC) in nessuna parte del convoglio.

A Bellinzona sono stati disinseriti i freni del carro 14, dopodiché il treno è ripartito dalla stazione alle ore 12.07. Alle ore 12:15, al passaggio sugli impianti di controllo dei treni di Claro poco prima del portale sud, non è stato registrato nessun avviso di «freno bloccato», il che significa che prima del portale della galleria i freni del carro 14 non erano attivati.

4.1.3.5 Video

L'analisi delle immagini video della stazione multifunzionale di Faido mostra che, al passaggio del treno 45016, si vedevano scintille soltanto sotto il carro 11 (Figura 52). Una volta che il treno ha lasciato quel tratto, risultavano visibili solo minimi danni al pavimento di cemento della galleria (Figura 53), il che dimostra che, in quest'area, l'assile deragliato del carro 11 era praticamente sospeso «in aria» sotto il carro e non sbatteva contro le trasverse in cemento armato.

4.2 Materiale rotabile e impianti tecnici

4.2.1 Sala montata BA 390

La sala montata fratturata del carro 11 è del tipo BA 390 (Figura 63) con un carico per asse di 22.5 t.

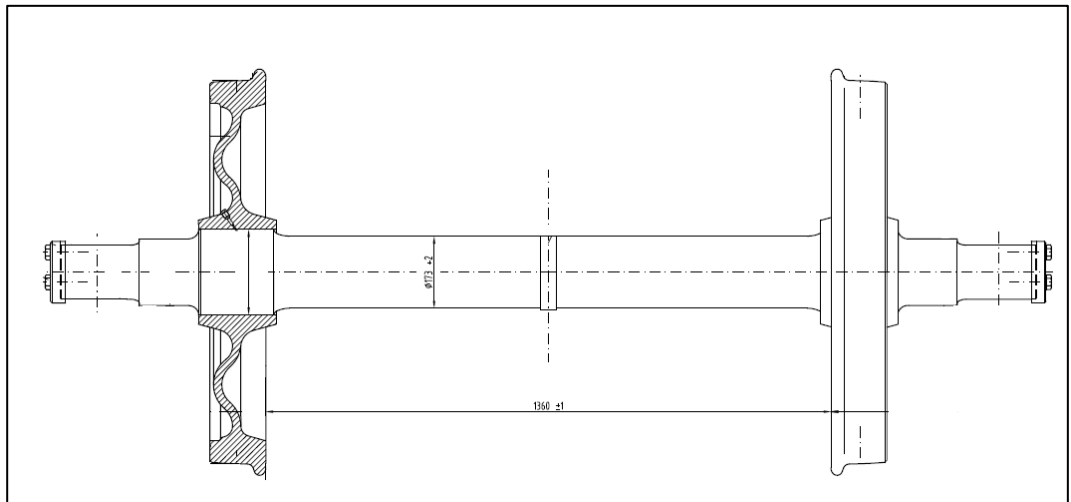


Figura 63: Disegno tipo della sala montata BA 390.

La ruota del tipo BA 390 è una ruota monoblocco (Figura 64) in acciaio di qualità ER7, fabbricata nel 2008 dalla società RAFIL (oggi Bochumer Verein).

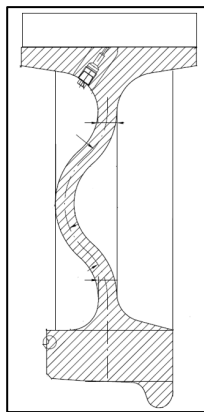


Figura 64: Disegno del tipo della forma di sala montata BA 390.

Secondo le specifiche delle linee guida VPI-04, le ruote devono essere pitturate esternamente con vernice termosensibile che, in caso di surriscaldamento della ruota dovuto ai freni, dovrebbe sfaldarsi in corrispondenza della transizione tra la corona della ruota e il disco.

4.2.2 Carro 11 (carro 466-2)

4.2.2.1 Descrizione

Il carro 466-2 è un carro a 4 assi con portellone scorrevole di tipo Laais, costituito da due unità ad aggancio corto a due assili (Figura 65). La lunghezza totale del carro (lunghezza tra i respingenti) è di 27 m, la velocità massima 120 km/h. Il carro era carico e aveva un peso complessivo di 80.1 t. Nella composizione del treno era collocato in undicesima posizione.



Figura 65: Carro di tipo Laais – simile a livello costruttivo al carro 11 (fonte: TWA).

4.2.2.2 Accertamenti

Il carro 466-2 è stato sottoposto a una revisione G 4.2 nel gennaio 2018.

Tra l'ultima revisione e il deragliamento il carro 466-2 è stato più volte in varie officine per diverse riparazioni minori, nessuna delle quali correlata agli assili. Nei vari verbali di reimmissione in servizio non si riportano anomalie alle sale montate.

I lavori e i controlli alle sale montate sono stati effettuati e documentati in conformità alle istruzioni di manutenzione delle linee guida VPI-04 e VPI-09.

I risultati della misurazione delle tensioni residue effettuata durante l'ultima IS2 erano inferiori ai valori massimi consentiti, specificati nelle linee guida VPI-04.

Dall'ultima IS2 la sala con la ruota fratturata ha percorso all'incirca 173 000 km.

La rottura della ruota non è riconducibile a una lacuna nella manutenzione delle sale montate del carro 466-2.

4.2.3 Controllo e misurazione delle sale montate dei carri 11 e 14

4.2.3.1 Sale montate del carro 11 (carro 466-2)

Tutte le sale del carro 11 sono state recuperate dalla galleria. Tutti i profili sono stati misurati tramite un sistema laser da parte del SISI.



Figura 66: Foto delle quattro sale montate del carro 11 dopo il recupero.

4.2.3.1.1 Sala 1 (81987)

La ruota destra è fratturata.

La ruota sinistra era fortemente deformata in prossimità del bordino e presentava una sfaccettatura della lunghezza di circa 30 cm sulla sua circonferenza (Figura 67).

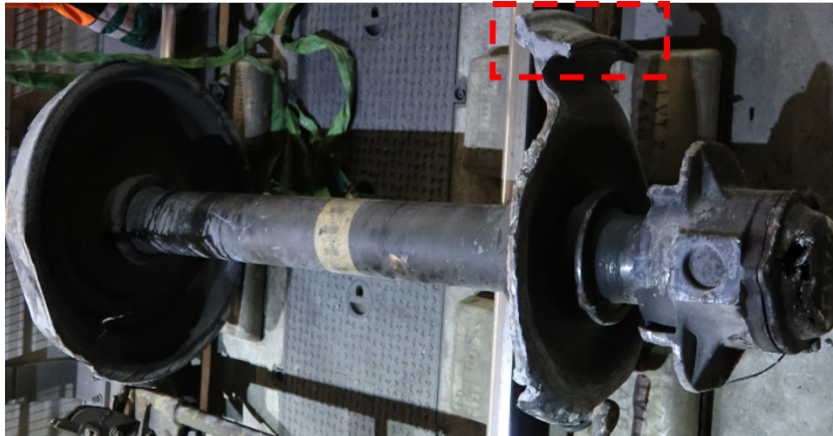


Figura 67: Foto della sala 1 in galleria durante le operazioni di recupero.

Tutte le misure del bordino della ruota sinistra (Sh, Sd, qR) coincidevano in larga misura con i valori a nuovo. La ruota sinistra non presentava infossature. Non sono presenti vaiolature significative.

La deformazione del profilo (linea blu) sulla sommità del bordino della ruota sinistra è una conseguenza del deragliamento (Figura 68).

Le ruote non presentano distacchi visibili della vernice. Secondo il protocollo dell'IS2 sono state pitturate con vernice del tipo BD 18.

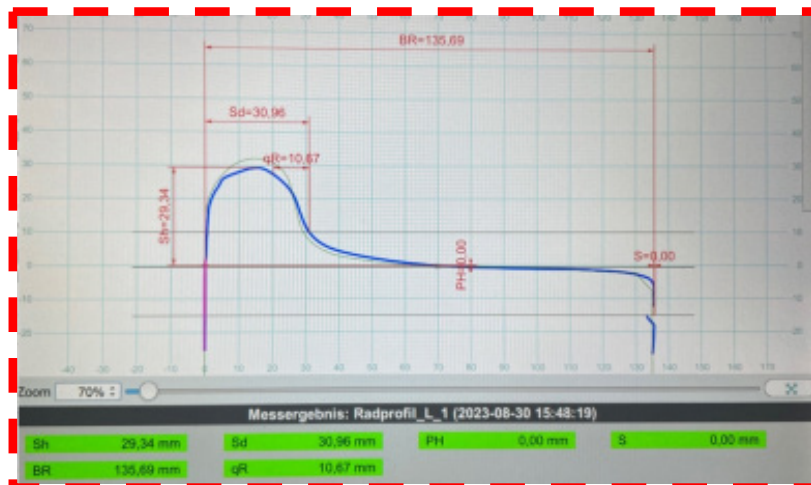


Figura 68: Profilo teorico / effettivo della ruota frantumata della sala 1. In verde: profilo a nuovo / teorico, in blu: profilo effettivo.

4.2.3.1.2 Sale 2– 4

Le sale 2–4 (Figura 66) presentavano lievi danni riconducibili al deragliamento.

Tutte le misure del bordino (Sh, Sd, qR) coincidevano in larga misura con i valori a nuovo. Su nessuna delle ruote erano riscontrabili infossature. Non sono presenti vaiolature significative né distacchi visibili della vernice sulle ruote.

4.2.3.1.3 Suole dei freni

Le suole dei freni LL ancora presenti sul carro 11 sono state smontate e sottoposte a esame visivo da parte del SIS.

Dall'esame è emerso quanto segue:

- le suole dell'assile 1 sono andate distrutte in seguito al deragliamento;
- a parte i danni meccanici dovuti allo svio, le suole dei freni degli assili 2-4 non presentano anomalie. Sulle suole non sono visibili segni di surriscaldamento;
- non è possibile risalire a quando le suole siano state montate.



Figura 69: Suole dei freni dell'assile 2 del carro 11

4.2.3.2 Sale montate del carro 14 (carro 579-2)

4.2.3.2.1 Inchiesta dopo il deragliamento

Le quattro sale del carro 14 sono state ispezionate dal SISl presso un'officina di manutenzione.

Le quattro sale sono progettate per sopportare un carico di 25 t. Una sala è equipaggiata con ruote del tipo BA 310, mentre le altre tre con ruote del tipo BA 307.

Tutti i profili delle ruote sono stati rilevati. Le tensioni residue di tutte le ruote sono state misurate tramite un sistema ad ultrasuoni secondo le prescrizioni delle linee guida VPI per il livello di manutenzione IS2 (Figura 70).

Risultati:

- una ruota della prima sala, rinvenuta nella canna ovest sul binario 7000, risulta deformata. Tutti gli altri assili non presentano danni di particolare entità;
- sugli altri tre assili non sono riconoscibili segni evidenti dovuti al deragliamento;
- tutti i profili delle ruote sono perlopiù in condizioni a nuovo;
- i valori di tensione residua di tutte le ruote sono compresi tra +19 e +139 Mpa (tensione residua di compressione, valore massimo consentito per questo tipo di ruote: da -300 a +400 MPa).



Figura 70: Foto di una sala montata durante la misurazione delle tensioni residue.

4.2.3.2.2 Suole dei freni

Le suole dei freni del carro 14-1 sono andate distrutte.

Le suole LL ancora presenti sugli assili del carro 14-2 sono state smontate e sottoposte a esame visivo.

A parte i danni meccanici dovuti allo svio, le suole dei freni degli assili 2-4 non presentano anomalie. Sulle suole non sono visibili segni di surriscaldamento.



Figura 71: Suole dei freni del primo assile del carro 14-2.

4.2.3.3 Manutenzione delle sale montate e revisione del carro 11 (carro 466-2)

4.2.3.3.1 Manutenzione delle sale montate

La manutenzione (IS2) delle sale è stata eseguita secondo le linee guida VPI (VPI-04 e VPI-09).

La sala 1 (81987) con la ruota fratturata è stata sottoposta a IS2 nell'ottobre 2017.

La sala 3 è stata sottoposta a IS2 nell'agosto 2016 e la sala 4 nel gennaio 2017.

4.2.3.3.2 Revisione del carro 11 (carro 466-2)

Durante la revisione G 4.2 del gennaio 2018, all'inizio dell'intervento si è proceduto allo smontaggio e allo stoccaggio delle sale. Terminata la revisione, le sale 2-4

sono state rimontate. La sala 1 (81987), sottoposta a IS2 nell'ottobre 2017, è stata rimontata sotto il carro 466-2.

Nel dicembre 2021 la sala 2 è stata sostituita dall'assile con il n. 128066.

La seguente tabella elenca le sale che risultavano montate al momento dell'incidente, con la data dell'ultima IS2.

	Sala nr.	Diametro	Anno	Tipo	Ultima IS2
1	81987 (X)	862 mm	2008	BA 390	10/2017
2	128066	920 mm	2021	BA 390	Keine - (neu 2021)
3	00410	896 mm	2010	BA 390P	08/2016
4	417326	902 mm	2011	59P	01/2017

Tabella 1: Revisione IS2 delle quattro sale del carro 11 (al 10.08.2023).

4.2.4 Perizia – esame metallurgico delle sale

La sala del carro 11 con la ruota fratturata e le altre tre sale intatte del medesimo carro sono state sottoposte a esame metallurgico.

Sulla sala difettosa sono state eseguite un'indagine frattografica, un'indagine al microscopio ottico, un'analisi chimica e una serie di controlli meccanici (prove di resilienza e misurazioni della durezza).

La tensione residua di tutte le ruote, inclusa quella del frammento più grande della ruota fratturata, è stata rilevata con vari metodi di misura (ultrasuoni e diffrazione dei raggi X¹¹).

4.2.4.1 Sala 1 difettosa (81987)

4.2.4.1.1 Controlli meccanici – analisi chimica delle ruote

I risultati della prova di resilienza e delle misurazioni della durezza effettuate sulla corona e sul disco della ruota corrispondono ai valori stabiliti dalle norme per il materiale ER7.

La durezza nell'area della corona è conforme alle specifiche della EN 13262¹² ed è superiore al valore minimo richiesto.

La composizione chimica è conforme alle specifiche del materiale ER7.

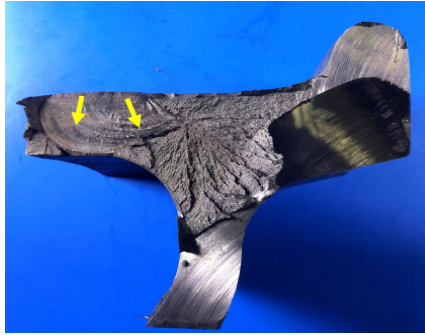
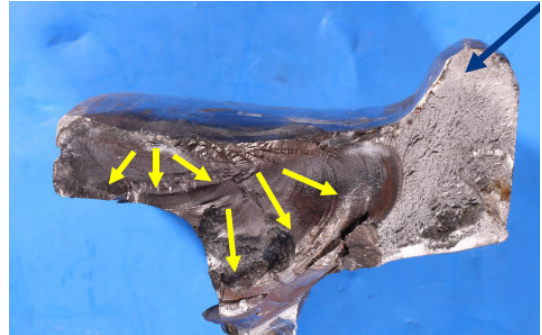
4.2.4.1.2 Indagine macroscopica e frattografica

Sono stati esaminati la sala difettosa con la ruota fratturata, i relativi frammenti e la ruota gemella.

Tutte le superfici di frattura presentano cricche a fatica che partono dalle superfici di rotolamento. Tutte le cricche si innescano più o meno verticalmente rispetto alla superficie di rotolamento.

¹¹ Diffrazione dei raggi X: dall'inglese X-ray diffraction.

¹² EN 13262: Applicazioni ferroviarie – Sale montate e carrelli – Ruote – Requisiti del prodotto.

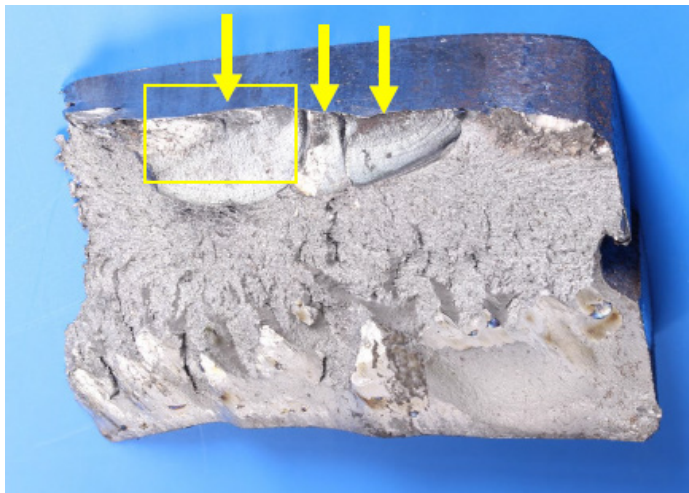
**Figura 72:** Frammento A.**Figura 73:** Frammento B.

Le Figura 72 e Figura 73 mostrano le immagini dell'indagine frattografica di due frammenti (frammenti A e B) della ruota fratturata. Frecce gialle: propagazione delle cricche a partire dalla superficie di rotolamento. Freccia blu: rottura di schianto (superficie di colore chiaro).

4.2.4.1.3 Indagine al microscopio elettronico a scansione e al microscopio ottico

L'immagine al microscopio elettronico a scansione mostra quanto segue:

- in prossimità della superficie di rotolamento sono riconoscibili vari punti di innesco. Sulla superficie di rotolamento sono presenti numerose altre incrinature iniziali;
- secondo le analisi il cedimento è avvenuto per snervamento (cricche a fatica) a partire dalla superficie di rotolamento.

**Figura 74:** Immagine del frammento al microscopio elettronico a scansione.

L'immagine al microscopio ottico mostra quanto descritto di seguito.

- Varie cricche si sono propagate parallelamente alla superficie di rotolamento.
- In prossimità dell'area di enucleazione delle cricche (Figura 75, rettangolo verde) non sono visibili danni meccanici, come deformazione o fatica da contatto per rotolamento (allegato 6, Figura 100). In questa zona il materiale è omogeneo. Non sono visibili «inclusioni» nell'area di innesco della rottura.

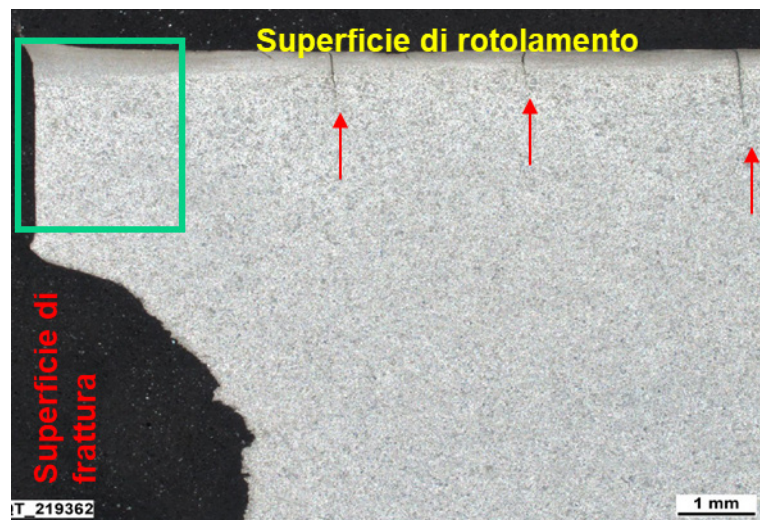


Figura 75: Immagine al microscopio ottico, superficie di rotolamento con svariate cricche.

- Le cricche sono riempite di prodotti di varia natura (Figura 76). Nel caso di specie, probabilmente si tratta di una combinazione tra corrosione e ossidazione da sfregamento (sfregamento dei bordi delle cricche e conseguente ossidazione delle superfici).



Figura 76: Micrografia, cricche riempite di prodotti.

4.2.4.1.4 Tensione residua

4.2.4.1.4.1 Misurazione delle tensioni residue nella ruota fratturata (destra)

Le misurazioni sono state effettuate sul frammento più grande mediante ultrasuoni e diffrazione dei raggi X.

Qui di seguito sono riportati i risultati delle misurazioni eseguite con diffrazione dei raggi X (Figura 78, Figura 80 e Figura 81).

Le tensioni residue sono state misurate nel disco della ruota e sulla superficie.

- Disco della ruota

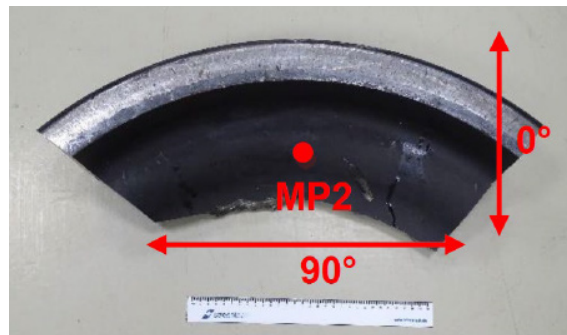


Figura 77: Misurazione delle tensioni residue sul disco della ruota al punto MP2.

Nel disco della ruota le tensioni residue di compressione¹³ sulla superficie sono pari a circa -200 MPa.

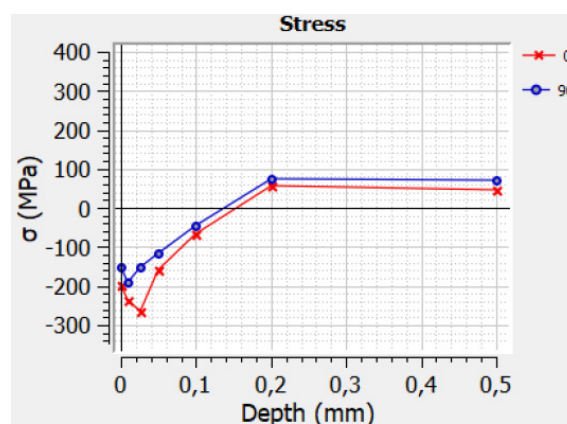


Figura 78: Valori di tensione residua nel disco in corrispondenza del punto di misurazione MP2.

Superficie di rotolamento

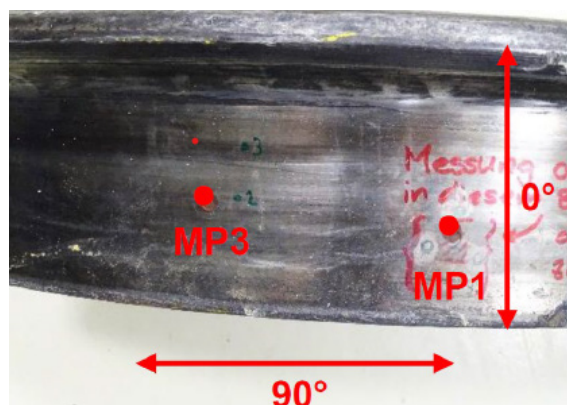


Figura 79: Misurazione delle tensioni residue sulla superficie ai punti MP1 e MP3.

Dalle misurazioni risultano notevoli differenze, a livello locale, nello stato tensionale residuo:

¹³ Le tensioni di compressione sono indicate con un valore negativo, mentre le tensioni di trazione con valore positivo.

- al punto MP1 le tensioni residue di compressione sulla superficie sono pari a circa -250 MPa;
- al punto MP3 si rilevano forti tensioni residue di trazione pari a circa +370 MPa;
- con l'aumentare della profondità le tensioni residue diminuiscono.

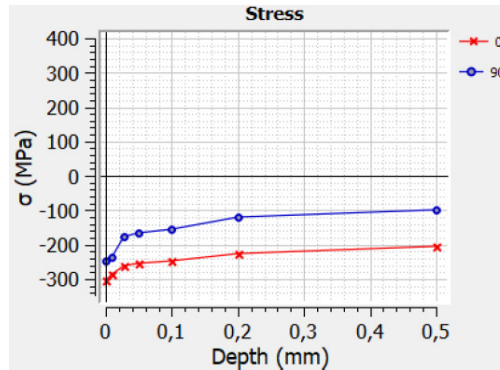


Figura 80: Valori di tensione residua sulla superficie al punto MP1.

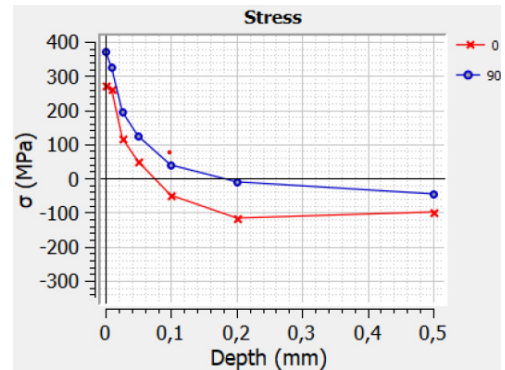


Figura 81: Valori di tensione residua sulla superficie al punto MP3.

4.2.4.1.4.2 Misurazione delle tensioni residue sulla ruota intatta (sinistra)

Sulla ruota sinistra le misurazioni mediante ultrasuoni sono state effettuate in quattro punti della corona distribuiti uniformemente lungo la circonferenza, sul lato interno.

I risultati delle misurazioni delle tensioni residue (valore medio) evidenziano tensioni residue di trazione comprese tra +54 MPa e +605 MPa.

4.2.4.2 Sala 2 (128066)

4.2.4.2.1 Magnetoscopia

Le ruote della sala montata sono state sottoposte a esame magnetoscopico¹⁴.

Le ruote erano in condizioni perlopiù pari al nuovo (fabbricazione nel 2021). Questa sala è stata montata sul carro 466-2 nel dicembre 2021. Fino al deragliamento aveva percorso circa 50 000 km.

L'esame evidenzia sporadici riscontri di fessure lineari (circa 15 mm di lunghezza) in direzione assiale sulla superficie di rotolamento (Figura 82).

¹⁴ Esame magnetoscopico: tecnica di controllo superficiale. Il componente da esaminare viene magnetizzato e irrorato con una soluzione arricchita di particelle di ferro in polvere. La variazione delle linee di campo in corrispondenza di cricche/discontinuità porta a un accumulo di particelle lungo i loro bordi.

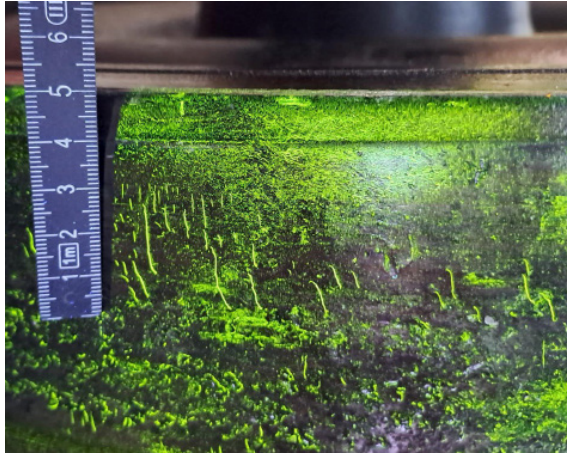


Figura 82: Esame magnetoscopico con riscontri di cricche lineari.

4.2.4.2.2 Indagine frattografica

Le ruote sono state preparate all'indagine approfondita mediante micrografia, nella quale si è individuato un innesco di cricche a partire dalla superficie di rotolamento. Le fessure evidenziano un'inclinazione piuttosto piatta, ma non si riesce ancora a definire con chiarezza la loro ulteriore propagazione.

4.2.4.2.3 Misurazione delle tensioni residue

Su ciascuna delle due ruote le misurazioni mediante ultrasuoni sono state effettuate in quattro punti della corona distribuiti uniformemente lungo la circonferenza, sul lato interno.

I risultati delle misurazioni delle tensioni residue (valore medio) evidenziano tensioni residue di compressione comprese tra -51 MPa e -129 MPa.

4.2.4.3 Sala 3 (00410)

4.2.4.3.1 Ispezione visiva

Dall'ispezione visiva delle superfici di rotolamento delle ruote è emerso quanto segue:

sulle superfici di rotolamento sono visibili aree a colorazione blu (Figura 83)



Figura 83:. Colorazione blu sulla superficie di rotolamento. Frecce gialle: riscontri di cricche.

4.2.4.3.2 Esame magnetoscopico, indagine metallografica e frattografica

L'esame magnetoscopico mostra riscontri lineari (circa 25–35 mm di lunghezza) in direzione assiale sulla superficie di rotolamento lungo l'intero perimetro.

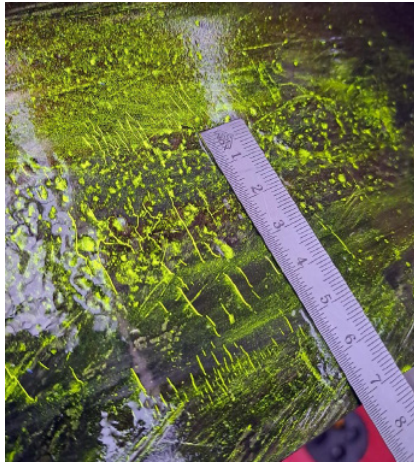


Figura 84: Riscontri di cricche sulla superficie di rotolamento di una ruota dell'assile 3.

Le ruote sono state preparate all'indagine approfondita mediante micrografia.

Dall'esame delle cricche emerge quanto segue:

- le cricche partono dalla superficie di rotolamento. Il loro andamento, più o meno verticale alla superficie a mano a mano che la profondità aumenta (riquadro giallo), è analogo ai sintomi riscontrati sulla ruota fratturata (Figura 85);
- in prossimità dell'area di enucleazione delle cricche non risultano danni meccanici visibili, ad es. segni di fatica da contatto per rotolamento (allegato 6, Figura 100).

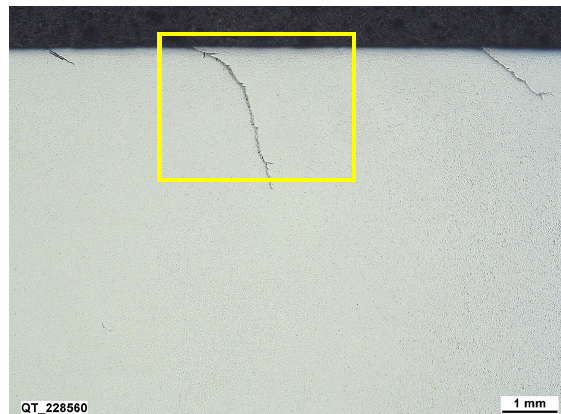


Figura 85: Indagine frattografica delle cricche sull'assile 3.

4.2.4.3.3 Misurazione delle tensioni residue

Su ciascuna delle due ruote le misurazioni mediante ultrasuoni sono state effettuate in quattro punti della corona distribuiti uniformemente lungo la circonferenza.

I risultati delle misurazioni delle tensioni residue (valore medio) evidenziano tensioni residue di trazione comprese tra +63 MPa e +101 MPa.

4.2.4.4 Sala 4 (417326)

- 4.2.4.4.1 Esame visivo, esame magnetoscopico, indagine metallografica e frattografica
Previa pulizia e con una buona illuminazione, le cricche sono visibili a occhio nudo sulla superficie (Figura 86).



Figura 86: Ricontri visivi di cricche sulla superficie.

Gli esiti dell'esame magnetoscopico sono sovrapponibili a quelli della sala 3.

La micrografia evidenzia la presenza di cricche visibili a partire dalle superfici di rotolamento (Figura 87). Le cricche si propagano più o meno perpendicolarmente alla superficie e, in alcuni casi, con un'inclinazione più piatta. Aumentando la profondità subiscono tuttavia una deviazione e assumono un andamento tutto sommato verticale.



Figura 87: Indagine frattografica delle cricche.

4.2.4.4.2 Misurazione delle tensioni residue

Su ciascuna delle due ruote le misurazioni mediante ultrasuoni sono state effettuate in quattro punti della corona distribuiti uniformemente lungo la circonferenza. I risultati delle misurazioni delle tensioni residue (valore medio) evidenziano tensioni residue di trazione comprese tra +48 MPa e +126 MPa.

4.2.5 Sintesi dei risultati dell'esame metallurgico

Qui di seguito vengono riepilogati i principali esiti dell'esame metallurgico. L'analisi completa è disponibile all'allegato 8.

4.2.5.1 Esiti relativi alla ruota destra fratturata della sala 1

- Le indagini visive e al microscopio elettronico a scansione delle superfici di frattura della ruota incidentata hanno evidenziato la presenza di cricche a fatica in tutti i frammenti e nella porzione di ruota residua. Tali fratture si sono formate sulla superficie di rotolamento per poi propagarsi perpendicolarmente a essa all'interno del materiale.
- Né le indagini al microscopio elettronico a scansione né le indagini metallografiche delle aree di innesco della rottura hanno evidenziato difetti nel materiale che avrebbero potuto favorire l'enucleazione delle cricche.
- La resistenza a trazione rilevata nella corona della ruota incidentata è pari a circa 850 MPa, per cui si può ipotizzare una resistenza a fatica compresa tra 300 e 550 MPa.
- Oltre alle tensioni residue di compressione (-250 MPa), sulla superficie è stata dimostrata anche la presenza di elevate tensioni residue di trazione ($+370$ MPa).
- Le tensioni residue di trazione presenti sulla superficie di rotolamento potrebbero aver notevolmente favorito, se non consentito, la formazione delle cricche. Non appena compaiono le prime incrinature iniziali, infatti, l'intensificazione degli sforzi (intensità di tensione elevate a livello locale) al loro apice promuove in misura determinante l'accrescimento e l'ulteriore propagazione delle cricche.
- Le elevate tensioni residue presenti sulla superficie di rotolamento sono considerate un fattore determinante per la formazione delle cricche.
- Sebbene sulla vernice presente nell'area del disco e sotto la corona della ruota non siano stati rivenuti segni di decolorazione o distacco della pittura quale indizio di un grave surriscaldamento, i processi in fase di frenatura vengono ritenuti determinanti per lo sviluppo di tensioni residue di trazione localizzate sulla superficie di rotolamento.

4.2.5.2 Esiti relativi alla sala con la ruota fratturata e alle sale 2–4

- Le indagini sulla seconda ruota (sinistra) della sala 1 evidenziano anche su di essa la presenza di cricche propagate dalla corona verso la parte interna del disco. L'indagine frattografica ha confermato che si tratta anche in questo caso di cricche a fatica, originatesi sulla superficie di rotolamento. La morfologia del danno è identica a quella della ruota fratturata. Considerando la combinazione fra la morfologia del danno ed il diametro della ruota vicino al valore minimo, si può supporre che anche questa ruota avrebbe potuto cedere se fosse rimasta in esercizio.
- La presenza di cricche da fatica sulle superfici di frattura indica che la tenacità ciclica del materiale dev'essere stata superata.
- La presenza di numerose altre cricche che partono dalla superficie di rotolamento evidenzia che si tratta di un fenomeno sistematico, non riconducibile a singoli difetti del materiale. La sala 2 (128066), fabbricata nel 2021 e con una percorrenza di circa 50 000 km, presentava già una serie di cricche con un'angolazione relativamente piatta. Su entrambe le sale 3 (00410) e 4 (417 326), dalle superfici di rotolamento partono varie cricche chiaramente visibili a occhio nudo (allegato 6, Figura 97 e Figura 99), che si propagano più o meno verticalmente rispetto alla superficie.

- Le tensioni residue di trazione documentate sulla superficie di rotolamento (sala 1, ruota intatta) sono superiori al valore di resistenza a fatica dell'acciaio considerato ai fini della progettazione. Molto probabilmente tali tensioni, unite alle sollecitazioni in esercizio, hanno determinato il superamento della resistenza a fatica, con conseguente formazione di cricche.

4.2.5.3 Considerazioni generali

- In un componente sottoposto a sollecitazioni cicliche, le tensioni residue di compressione migliorano la resistenza a fatica, dal momento che occorre innanzitutto superarle prima che si generino le tensioni residue di trazione necessarie all'enucleazione di una cricca. Le tensioni residue che si sviluppano all'interno della corona mirano pertanto a prevenire la formazione di cricche a fatica. Le tensioni residue di trazione, come un precarico sul materiale, si sommano invece alle sollecitazioni in esercizio.
- Alcuni metalli, come l'acciaio utilizzato per le ruote, possiedono un valore limite per le tensioni applicate – la cosiddetta resistenza a fatica – al di sotto del quale, durante la vita utile del componente, non si deve tener conto della possibile formazione di fessure da fatica. Una sala montata va quindi progettata in maniera tale che i carichi ciclici attesi in fase di esercizio non superino la resistenza a fatica. La formazione di cricche a fatica nei materiali metallici avviene per la presenza di movimenti di dislocazione già al di sotto del limite di snervamento¹⁵. Nei metalli le dislocazioni che, seppur minime, possono verificarsi nel corso di un ciclo di carico, sono causa di deformazione plastica. Il presupposto affinché ciò avvenga è che sulla superficie del materiale siano presenti sollecitazioni di trazione tali da indurre un movimento di dislocazione.
- Nonostante tutte le tre sale intatte del carro 11 abbiano cicli di vita differenti dal punto di vista della percorrenza (chilometri percorsi) e le ruote anni di fabbricazione diversi, dall'esame metallurgico è emerso che tutte le ruote presentavano cricche con le medesime caratteristiche.
- Alcune superfici di rotolamento presentano una colorazione blu di rinvenimento visibile a occhio nudo, ma nessuna delle ruote ha subito un distacco della vernice in seguito a surriscaldamento dei corpi delle ruote.
- La formazione e la diffusione delle cricche è identica in tutte le superfici di frattura analizzate. Tutte le cricche partono dalla superficie di rotolamento, più o meno verticalmente rispetto alla superficie anche con l'aumento della profondità. L'aspetto è dunque analogo a quello riscontrato sulla ruota fratturata. Si tratta in tal caso di un problema sistematico.
- L'analisi comparativa delle tensioni residue mediante ultrasuoni e diffrazione dei raggi X ha evidenziato che le misurazioni ultrasonografiche effettuate durante la manutenzione consentono solo in parte di formulare una conclusione in merito allo stato delle tensioni residue direttamente sulla superficie di rotolamento, per cui l'area della superficie di rotolamento determinante per l'enucleazione della cricca non può essere sufficientemente esaminata.
- Nonostante la tecnica utilizzata in laboratorio per la misurazione della tensione residua sia diversa da quella impiegata in fase di manutenzione, i risultati confermano che sulla superficie di tutte le ruote esaminate si sono registrati valori con elevate tensioni residue di trazione, quando invece nell'intera area

¹⁵ Limite di snervamento: passaggio da una deformazione elastica a una plastica

soggetta a usura la tensione residua dovrebbe essere di compressione (allegato 7, specifiche della norma EN 13262).

- Le tensioni residue di trazione sulla superficie di rotolamento possono insorgere per effetto di deformazioni plastiche, microstruttura disomogenea o influssi termici. Tutte le ruote intatte esaminate non presentavano né deformazioni plastiche, causate da sollecitazioni in fase di rotolamento, né una microstruttura disomogenea (Figura 88).



Figura 88: Ruota intatta dell'assile 3 con cricca verticale, senza deformazione plastica. Per i dettagli si rimanda all'allegato 6, Figura 100.

- L'unico fattore esterno che rimane è dunque il fatto che le tensioni residue sulla superficie della ruota si generino per effetto di un sovraccarico termico.
- In fase di movimento la superficie della ruota subisce un sovraccarico termico in caso di contatto prolungato con le suole dei freni, il che può avvenire a causa di un freno bloccato o di un rilascio non completo o troppo lento dei freni.

4.2.5.4 Suggerimenti dal punto di vista metallurgico per prevenire casi futuri

Dalle indagini è risultato che le cricche a fatica responsabili del cedimento si sono propagate dalla superficie di rotolamento al disco delle ruote. Le cricche erano di lunghezza considerevole prima che si giungesse al cedimento catastrofico e al deragliament.

- Pare dunque opportuno valutare l'introduzione di adeguati controlli non distruttivi in grado di rilevare le cricche superficiali sulle superfici di rotolamento.
- Visto che le cricche hanno origine sulla superficie di rotolamento, si suggerisce inoltre di sondare le possibilità con cui ridurre in particolare il carico termico in fase di frenata, visto il suo impatto negativo sullo stato tensionale residuo in prossimità delle superfici di rotolamento.

4.2.6 Controllo tecnico prima del licenziamento del treno

Il treno è stato sottoposto a un controllo tecnico a Chiasso.



Figura 89: Possibile vista su una ruota di un carro di tipo Laaiis. (Immagine simile a quella del carro 8 del treno merci 45016 scattata fuori dalla galleria).

Il controllo visivo delle condizioni della faccia esterna della ruota può essere effettuato soltanto nella parte inferiore (Figura 89), dal momento che i parasale presenti a destra e a sinistra della boccola limitano fortemente la visuale.

Non è possibile, invece, effettuare un controllo visivo della faccia interna della ruota sui binari.

L'unico modo efficace per cercare eventuali cricche presenti sulla ruota è pertanto il controllo in fase di manutenzione nella fossa.

4.3 Fattori umani

4.3.1 Caratteristiche umane e individuali

I due controllori tecnici (CTC) disponevano delle qualifiche necessarie a svolgere il loro lavoro.

Il CTC che ha preparato e controllato il treno a Chiasso opera come controllore tecnico dal 1990, per cui è da considerarsi un esperto. L'ultimo suo corso di perfezionamento come CTC è stato svolto nell'ottobre 2022.

Il CTC che ha disinserito i freni del carro 14 a Bellinzona opera in tale funzione dal 2006, per cui è da considerarsi un esperto. L'ultimo suo corso di perfezionamento come CTC è stato svolto nel settembre 2021.

4.3.2 Fattori e incarichi organizzativi:

Non rilevante.

4.4 Meccanismi di feedback e di controllo,

4.4.1 Quadro-legislativo

4.4.1.1 Regolamenti VPI – manutenzione delle sale

Le direttive guida VPI diventano vincolanti quando il proprietario del veicolo dichiara che sono il suo manuale di manutenzione ufficiale in essere.

In questo capitolo vengono citate soltanto le principali linee guida VPI correlate alla manutenzione delle sale montate (VPI-04).

Attualmente la manutenzione delle sale (riprofilatura con controllo non distruttivo) è abbinata all'intervallo di ispezione delle boccole (660 000 km o 8 anni). Questa prassi sviluppata e consolidata ormai da anni è stata introdotta quando i carri merci erano ancora muniti di suole dei freni in ghisa grigia, ma poi mantenuta anche con l'introduzione delle suole LL.

L'attuale metodo di misura (Figura 70) rileva la tensione residua soltanto in una determinata area della corona della ruota e restituisce un valore medio. Non è tuttavia in grado di rilevare un aumento della tensione residua sulla superficie della ruota, il che significa che con l'odierno sistema di misura non è possibile individuare il punto in cui si enuclea una cricca in seguito a un'eccessiva tensione residua. Come indicato nel presente rapporto al capitolo 4.2.4 «4.2.4 Perizia – esame metallurgico delle sale», la presenza di tensioni residue di trazione rappresenta un fattore determinante per lo sviluppo di cricche sulla superficie di rotolamento di una ruota.

Al giorno d'oggi, inoltre, le condizioni d'esercizio dei carri merci sono cambiate: la velocità dei treni merci è stata innalzata e le suole dei freni in ghisa grigia sono state sostituite da suole a ceppi in materiale composito. L'intervallo di manutenzione (660 000 km o 8 anni) e il metodo di misurazione delle tensioni residue definiti nelle linee guida VPI-04 non sono dunque più attuali. Considerate le circostanze odierne, vi è una grande probabilità che il processo critico di enucleazione delle cricche e l'incremento localizzato delle tensioni residue, sulla superficie di rotolamento della ruota, non si riescano ad individuare a uno stadio precoce.

4.4.2 Safety Management System

Il Safety Management System (SMS) di un'impresa di trasporto ferroviario ha il compito di garantire che l'organizzazione controlli in maniera sicura i rischi derivanti dai propri obiettivi aziendali e soddisfi tutti i requisiti di sicurezza vigenti.

L'SMS condensa in un tutt'uno le direttive, i processi, le regole e le istruzioni dell'impresa e fa sì che si mantenga costantemente il livello di sicurezza.

I processi SMS di SBBC relativi alla preparazione del treno e alle misure correttive in caso di irregolarità presenti sul carro sono descritte al capitolo 4.4.3 e oggetto di analisi e valutazione da parte del SISI.

4.4.3 Processi

4.4.3.1 Preparazione del treno a Chiasso – intervento a Bellinzona

4.4.3.1.1 Preparazione del treno a Chiasso

L'ispezione tecnica dei 30 carri in composizione al treno 45016 si è svolta alla stazione di Chiasso.

Il treno 45016 era composto da cinque gruppi di carri, per cui vi sono cinque verbali disponibili (controllo tecnico, elenco dei componenti con firma dei CTC). Gli esiti del controllo tecnico sono stati riepilogati nella parte alta della lista del treno 45016. In tale documento (allegato 9, Figura 102) sono stati verbalizzati anche gli esiti della prova dei freni. Anche tutti i nomi dei CTC figurano in testata alla lista.

La qualità di questo documento presenta una serie di criticità. Il fatto che alcuni elenchi di componenti siano stati riportati in un altro documento può generare errori in fase di trascrizione e complica i processi di analisi e verifica.

4.4.3.1.2 Intervento a Bellinzona

Dopo la fermata del treno a Bellinzona, il CTC incaricato ha proceduto al disinserimento dei freni del carro 14 (carro 579-2) e al controllo della boccola. Sulle ruote non sono state rilevate tracce di surriscaldamento o distacco di vernice. Successivamente si è proceduto a effettuare una prova dei freni, onde garantire che i freni del carro 14 non fossero bloccati, e una modifica del calcolo di frenatura. Alle ore 12:07 il treno 45016 partiva dalla stazione di Bellinzona e alle ore 12:15 passava per l'impianto di controllo ICT di Claro. Da parte di nessuno dei carri del treno 45016 è stato attivato un messaggio di allarme valore d'intervenzione HFO superato (allegato 3, Figura 95). Anche sul carro 14 non è stato rilevato un aumento di temperatura, per cui i freni erano allentati.

A Bellinzona il carro 14 è stato contrassegnato correttamente come previsto all'allegato 9 del CUU. Le prescrizioni contenute nell'SMS di SBBC al capitolo 5.6.2 «Eseguire il servizio di trasporto, misure da adottare in caso di irregolarità al carro» sono state rispettate.

4.4.4 Attività di supervisione

Non rilevante.

4.4.5 Autorizzazioni, certificati e rapporti di valutazione**4.4.5.1 Sala montata tipo BA 390**

Non rilevante, dal momento che il tipo della sala in questione era stato introdotto sul mercato e risultava in esercizio già prima dell'entrata in vigore del nuovo processo di omologazione.

4.4.5.2 Suole dei freni LL

Tra le misure di risanamento fonico delle ferrovie, sui carri merci le suole dei freni in ghisa grigia sono state sostituite con suole a ceppi in materiale composito.

I seguenti documenti sono stati redatti o sottoposti a revisione da parte dell'UIC:

- *La fiche UIC 541-4, 4a edizione, dicembre 2010 «Freni con ceppi in materiale composito – Condizioni generali per la certificazione di ceppi in materiale composito»,*
- *l'allegato M della fiche UIC 541-4 «Ceppi in materiale composito certificati per il traffico internazionale»,*
- *l'allegato M3 della fiche UIC 541-4 (10a edizione, agosto 2013) – Ceppi in materiale composito con un basso livello d'attrito (LL).*

Nell'allegato M3 la sostituzione delle suole dei freni in ghisa grigia con suole LL (IB 116*) è indicata come «prodotto interamente certificato».

4.4.6 Rilevatore di deragliamento

Il carro 11 (carro 466-2) deragliato non era provvisto di rilevatore di deragliamento.

Il tema viene comunque affrontato in questa sede, dal momento che i rilevatori di deragliamento possono influire sull'entità dei danni all'infrastruttura.

Installati sulle casse dei carri, i rilevatori di deragliamento utilizzati attualmente sono dei sistemi meccanici o pneumatici che reagiscono a un'eventuale accelerazione verticale generata da un assile deragliato nel momento in cui entra in collisione con le traverse. L'attivazione del rilevatore provoca lo svuotamento della condotta dell'aria principale e quindi l'arresto del treno.

La rottura di una ruota non viene captata direttamente dal rilevatore di deragliamento. Quest'ultimo si attiva soltanto per effetto delle accelerazioni verticali che si generano nel momento in cui, a seguito della rottura di una ruota, un assile perde la guida sul binario, deraglia e urta contro le traverse.

Nell'evento in questione, l'assile 1 ha perso la guida sul binario poco dopo la rottura della ruota, causando un breve contatto tra la ruota sinistra, ancora intatta, e le traverse biblocco in cemento armato. In seguito all'impatto l'assile è stato spinto all'indietro di circa 45° rispetto alla posizione normale. A quel punto la ruota sinistra ha strisciato per un breve periodo sul pavimento di cemento, lasciando solo una traccia sottile, mentre la ruota destra fratturata era sollevata da terra (Figura 42).

Tra il km 46 e il km 41 la ruota sinistra non ha toccato il pavimento di cemento, per cui in quella fase non ci sono state accelerazioni verticali (Figura 46). L'assile era ancora in contatto con i pacchi di molle balestra. In questo tratto di linea, anche i porta suole hanno ripetutamente urtato le traverse biblocco in cemento armato. I due triangoli dei freni (Figura 6), allentati ma ancora appesi alle funi di ritenuta, non potevano generare un'accelerazione verticale sufficientemente elevata da poter essere trasmessa anche alla cassa del carro e quindi a un eventuale rilevatore di deragliamento.

Non è certo, dunque, se un breve contatto con le traverse di cemento armato (Figura 41) sarebbe stato sufficiente ad attivare un rilevatore di deragliamento.

Come si vede anche nell'immagine del video (Figura 53) successiva al passaggio del treno nella SMF di Faido, in quell'area l'infrastruttura presentava solo lievi segni sul pavimento di cemento.

Soltanto in prossimità del cambio corsia, a ridosso dello scambio W387, dove l'assile deragliato ha lasciato evidenti segni di impatto sulle traverse monoblocco (Figura 45), sarebbe scattato un eventuale rilevatore di deragliamento. La sua attivazione in quel momento, tuttavia, non avrebbe ridotto l'entità dei danni in prossimità della SMF di Faido. Quasi contemporaneamente, infatti, la condotta dell'aria

principale è stata comunque svuotata con la revoca della «Movement Authority» da parte dell'RBC in seguito alla perdita di controllo dello scambio.

4.5 Simili eventi precedenti – rotture di ruote

In Europa il trasporto merci su rotaia si svolge a livello transfrontaliero, per cui garantire l'interoperabilità dei carri merci è una premessa fondamentale.

Negli anni 2016 e 2017 in Italia e Belgio, su carri merci equipaggiati con ruote dei tipi BA 314 e BA 004, si sono verificate diverse rotture e cricche che hanno interessato la corona e il disco della ruota.

Per analizzare questi casi è stata istituita una task force denominata «Urgent Procedures JNS Broken wheels¹⁶».

Nel rapporto finale del 28 luglio 2027 la task force ha definito dei provvedimenti, a breve e lungo termine, per la manutenzione e per limitare i rischi d'esercizio inerenti i due tipi di ruote coinvolte e presentato delle proposte di modifica a norme e ordinanze.

Per quanto riguarda le cricche nella corona delle ruote appartenenti al tipo BA 004, il documento afferma che in alcune applicazioni la probabilità che si inneschino difetti di origine termica è maggiore.

Tra i provvedimenti definiti nel rapporto JNS del 28.07.2017, al fine di limitare i rischi in fase di esercizio, per entrambe i tipi di ruote si è definito un diametro minimo di 880 mm.

La forma della ruota BA 390 (Figura 64) è analoga a quella del tipo BA 004.

4.6 JNS Broken Wheels Gotthard

Sulla base del rapporto intermedio del SISI del 22 settembre 2023, in data 17 ottobre 2023 l'UFT ha presentato all'ERA una richiesta di apertura di una procedura JNS. Il 24. ottobre 2023 è stata quindi costituita la JNS Task Force «Accident Gotthard base tunnel – broken wheels» allo scopo di analizzare quei casi. Tutti i rapporti del JNS sono pubblicati sul sito Internet dell'ERA¹⁷.

Il gruppo di lavoro JNS ha esaminato 74 casi (Broken wheel – visual crack detection or cracks found by NDT Testing) riguardanti diversi tipi di ruote.

Di questi 74 casi, dieci sono stati registrati perché causa della rottura di una ruota o perché, al controllo visivo, sono state individuate cricche nelle ruote. In tutti questi 10 casi le sale avevano un diametro delle ruote uguale o inferiore a 880 mm.

4.7 Analisi della letteratura

4.7.1 Studio svedese –comportamento termo-meccanico di ruote frenate a ceppi

Lo studio sul comportamento termo-meccanico di ruote frenate a ceppi – modellazione del materiale e indagini sperimentali è stato condotto presso la facoltà di

¹⁶ JNS- Joint Network Secretariat: procedures aim at EU-wide harmonisations of any action taken after any issue, e.g. accidents or incidents in railways in the EU.

¹⁷ Link to all JNS Procedures: [Joint Network Secretariat \(JNS\) | European Union Agency for Railways \(europa.eu\)](https://www.eurail.eu/jns/)

meccanica applicata della Chalmers University of Technology nel periodo 2019–2022¹⁸.

È parte del progetto SD11 «Tread Braking - Capacity, Wear and Life» del Swedish National Centre of Excellence in Railway Mechanics.

Qui di seguito vengono riportati in corsivo i principali passaggi dello studio:

Alcuni episodi di danneggiamento o rottura delle ruote in seguito a influssi termo-meccanici vengono pubblicati dal JNS sul sito ufficiale dell'Unione europea. Nel 2016 sono state esaminate varie ruote non fratturate del tipo BA314/ZDB29 e BA004 interessate da cricche. Dall'analisi è emerso che i difetti erano stati causati, almeno in parte, da un surriscaldamento. Da questi casi sono scaturite nuove proposte circa l'utilizzo delle ruote e la modifica di norme e regolamenti, in particolare per quanto riguarda il predimensionamento termo-meccanico e i requisiti di progettazione delle ruote.

I freni a ceppi sono un tipo di freno ad attrito comunemente utilizzato nell'industria ferroviaria. I moderni ceppi in materiale composito, concepiti per ridurre le emissioni acustiche, comportano tuttavia una maggiore sollecitazione termica a carico della ruota, essendo in grado di assorbire e immagazzinare una quantità minore di calore da attrito rispetto ai vecchi ceppi in ghisa grigia. Una frenata di rallentamento prolungata può aumentare la temperatura del cerchione di diverse centinaia di gradi. Dopo il raffreddamento, le tensioni residue generatesi al suo interno possono comportare la rottura della ruota. Le alte temperature provocano inoltre una degradazione permanente della microstruttura perlitica.

Indagine sul banco di prova

Su un banco di frenatura di ultima generazione si sono analizzati la distribuzione e lo sviluppo della temperatura sulla superficie di rotolamento di una ruota mediante la simulazione di frenate a 30 e 50 kW. Una termocamera è stata utilizzata per scattare immagini della superficie di rotolamento e del cerchione in fase di frenata e individuare eventuali punti caldi. Il tutto è stato integrato con elementi termosensibili a contatto strisciante per il rilievo delle temperature medie della superficie di rotolamento. Dalle prove è emerso che la distribuzione della temperatura non è uniforme, con hot spot evidenti e pressoché fissi lungo la circonferenza della ruota.

Modellazione termica

Le simulazioni svolte con l'utilizzo di un modello di materiale calibrato a livello termo-meccanico mostrano un incremento misurabile delle tensioni residue medie e massime in prossimità degli hot spot. L'intensità delle tensioni aumenta esponenzialmente al crescere della temperatura degli hot spot, da cui si deduce che le analisi che ipotizzano unicamente temperature medie sottovalutano il danno indotto.

4.7.2 Wheel Tread Damage Guide T 963¹⁹

Il Rail Safety and Standards Board (RSSB-UK) è l'organismo indipendente di sicurezza, normazione e ricerca per la rete ferroviaria britannica.

The RSSB research project T963 [Miglioramento della vita utile delle sale montate attraverso una migliore comprensione delle cause di danneggiamento delle ruote]

¹⁸ Chalmers University of Technology, Material modelling and experimental investigations, Thermomechanical behaviour of tread braked wheels, Eric Voortman Landström (2022).

¹⁹ [Improving wheelset life by better understanding the causes of wheel damage \(T963\)](#)

has investigated the links between wheelset life and train configuration, route, maintenance practices and the use of condition monitoring.

Chapter: *Influence in running - stress in the wheel*

Sustained heat input from heavy tread braking can cause relaxation and reversal of the protective residual stresses, which can lead to sudden catastrophic failure of the wheel by cracking. Localised high heat inputs during wheel spin or slide events followed by rapid cooling can cause the steel to transform from pearlite to a hard brittle structure called martensite. This often leads to formation of cavities and cracks.

4.7.3 Sintesi

Come risulta dallo studio svedese (capitolo 4.7.1), le soles dei freni in materiale composito sono causa di una maggiore sollecitazione termica a carico della ruota. La distribuzione della temperatura sulla superficie di rotolamento non è uniforme, con hot spot evidenti e pressoché fissi lungo la circonferenza della ruota.

Anche l'RSSB, nel suo progetto T963 «Miglioramento della vita utile delle sale montate attraverso una migliore comprensione delle cause di danneggiamento delle ruote», cita il fatto che l'esposizione prolungata al calore dovuta a una brusca frenata che induce una sollecitazione termica sulla superficie di rotolamento può comportare un'inversione delle tensioni residue di compressione in tensioni di trazione, con conseguente improvviso cedimento catastrofico della ruota a causa della formazione di cricche.

Il documento pubblicato il 28 luglio 2017 dalla JNS Task Force «Broken Wheels» afferma che, per quanto riguarda le cricche nella corona delle ruote del tipo BA 004, in alcune applicazioni la probabilità che si sviluppino difetti indotti termicamente è maggiore.

Alla luce di quanto sopra, i risultati qui riportati confermano le conclusioni dell'esame metallurgico, secondo cui un surriscaldamento della superficie di rotolamento comporta la formazione di cricche. Le fessure verticali che si propagano dalla superficie di rotolamento come cricche a fatica sono difetti gravi che, col passare del tempo, possono sfociare in una rottura della ruota, se non individuate e trattate a uno stadio precoce.

5 Conclusioni

5.1 Sintesi

5.1.1 Impresa di trasporto ferroviario

5.1.1.1 Preparazione del treno a Chiasso e intervento a Bellinzona

- L'ispezione tecnica dei 30 carri in composizione al treno 45016 si è svolta alla stazione di Chiasso.
- Gli esiti dei controlli tecnici e gli esiti della prova dei freni sono stati riportati nella lista del treno 45016. Non sono state verbalizzate irregolarità.
- Il carro 14 (carro 579-2) è stato ispezionato a Bellinzona e si sono disinseriti i freni.
- A seguito del disinserimento dei freni del carro 14 si è compilato un nuovo calcolo di frenatura per il treno 45016.

5.1.2 Infrastruttura

5.1.2.1 Gestione dell'esercizio

Il treno 45016 stava attraversando la Galleria di base del San Gottardo (binario 7000) in modalità «Full Supervision» (FS) con «Movement Authority» (MA) e una velocità massima consentita di 95 km/h.

5.1.2.2 Impianti di controllo dei treni

- Al passaggio del treno 45016 sull'impianto di controllo di Claro (poco prima del portale sud della GBG) non sono state rilevate irregolarità tramite gli impianti HFO e RLC.
- Gli impianti di controllo dei treni hanno funzionato correttamente.

5.1.2.3 Impianti di sicurezza

- Gli scambi W387 e W386 della stazione multifunzionale di Faido hanno segnalato una perdita di posizione finale.
- L'RBC ha immediatamente revocato la «Movement Authority» del treno, facendo scattare una frenata d'emergenza sulla locomotiva occupata.
- Un'anomalia dei conta-assi successiva al passaggio di un treno non ha alcun influsso sulla «Movement Authority» di quel convoglio.
- Gli impianti di sicurezza hanno funzionato correttamente.

5.1.2.3.1 Binari

- In galleria, all'altezza del km 47.30 è stato rinvenuto il primo frammento di ruota della sala 1 del carro 11 (carro 466-2). Il frammento ha colpito le traverse biblocco in cemento armato, per poi finire sulla banchina.
- Tra il km 47.10 e 46.70 sono stati individuati altri sei frammenti di ruota.
- Quando l'assile ha perso la guida sul binario (km 46.7), la ruota sinistra ha sbattuto brevemente contro le traverse biblocco in cemento armato.
- Poco dopo, al km 46.60, il bordino della ruota sinistra deragliata ha lasciato segni di abrasione sul pavimento in cemento della galleria.

- Tra il km 46 e il km 41 la ruota sinistra dell'assile deragliato non ha toccato il pavimento di cemento per circa 5 km.
- In seguito al deragliamento della sala, tra il km 46 e 41 i porta suole hanno sbattuto più volte contro le traverse in cemento armato.
- Varie schegge delle suole sono state ritrovate a terra e sulla banchina laterale sul tratto di linea compreso tra il km 46 e 41.
- Alla stazione multifunzionale di Faido la ruota sinistra deragliata ha sbattuto contro la prima traversa monoblocco dello scambio W387.
- La porta di cambio corsia è stata abbattuta dal carro 14-2.

5.1.2.3.2 Scambi Hydrostar

- Gli attuatori e le chiusure degli scambi Hydrostar W386 e W387 sono stati distrutti dall'assile deragliato.
- Gli aghi e il cuore a punta mobile dello scambio W386 hanno pertanto assunto posizioni indefinite e una controrotaia è andata in parte distrutta, con conseguente assenza di un percorso prestabilito e la perdita della guida del veicolo sul binario.

5.1.3 Materiale rotabile

5.1.3.1 Locomotive e carri da 1 a 10

I controlli alle due locomotive e ai primi dieci carri del treno non hanno riscontrato anomalie.

5.1.3.2 Carro 11

5.1.3.2.1 Sala 1 (81987)

- L'ultima manutenzione IS2 della sala 1 risalente a ottobre 2017 è stata effettuata e verbalizzata ai sensi delle linee guida VPI.
- Dopo la IS2 il diametro della ruota era di 862 mm.
- Il profilo della ruota (misure del bordino Sh, Sd, qR) dopo la IS2 era pressoché pari al nuovo, dopo circa 173 000 km di percorrenza.
- La rottura della ruota destra della prima sala del carro 11 (carro 466-2) non è riconducibile a una lacuna nell'esecuzione dei lavori di manutenzione della sala.

Ruota fratturata

- Oltre alle tensioni residue di compressione (-250 MPa), sulla superficie è stata dimostrata anche la presenza di elevate tensioni residue di trazione ($+370$ MPa).
- Le analisi metallografiche hanno rilevato la presenza di cricche nelle immediate vicinanze della posizione di misurazione delle tensioni residue di trazione.
- Accanto al punto di misurazione delle tensioni residue la ruota presentava una cricca verticale della profondità di circa 2 mm (Figura 90).

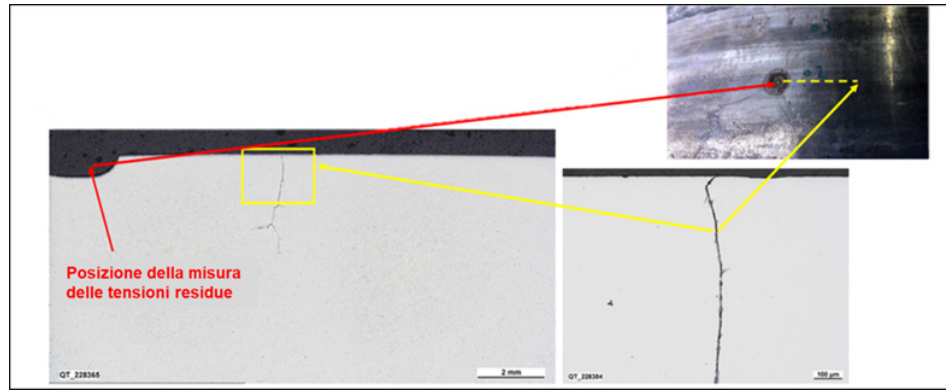


Figura 90: Punto di misurazione delle tensioni residue e posizione della cricca. La cricca si sviluppa verticalmente rispetto alla superficie.

- In prossimità della superficie di rotolamento sono riconoscibili vari punti di innesco. Sulla superficie di rotolamento sono presenti numerose altre incrinature iniziali (Figura 74).
- In prossimità dell'area di enucleazione delle cricche non sono visibili danni meccanici (fatica da contatto per rotolamento) né inclusioni nel materiale (Figura 75).

Ruota intatta

Le tensioni residue di trazione documentate sulla superficie di rotolamento sono superiori al valore di resistenza a fatica dell'acciaio di qualità ER7 considerato ai fini della progettazione. Con l'aumentare della profondità le tensioni residue diminuiscono.

5.1.3.2.2 Sala montata 3

- Tutte le misure del bordino (Sh, Sd, qR) coincidevano in larga misura con i valori a nuovo.
- Non sono presenti vaiolature significative.
- Sono presenti varie cricche che partono dalla superficie di rotolamento. Il loro andamento (Figura 91), più o meno verticale alla superficie a mano a mano che la profondità aumenta, è analogo a quello rilevato nella ruota fratturata (Figura 75).
- In prossimità delle aree di enucleazione delle cricche non sono visibili danni meccanici (fatica da contatto per rotolamento) né inclusioni nel materiale.

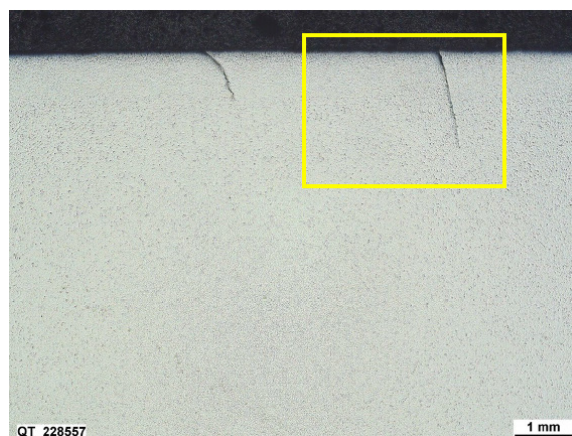


Figura 91: Immagine al microscopio ottico della superficie di rotolamento.

- Le elevate tensioni residue presenti sulla superficie di rotolamento sono considerate un fattore determinante per la formazione delle cricche.
- La presenza di numerose superfici di frattura di identica morfologia e di svariate altre cricche verticali che partono dalla superficie di rotolamento evidenzia che si tratta di un fenomeno sistematico, non riconducibile a singoli difetti del materiale.

5.1.3.2.3 Sale 2 e 4

- Le due sale non presentavano danni di particolare entità.
- Tutte le misure del bordino (Sh, Sd, qR) coincidevano in larga misura con i valori a nuovo.
- Non sono presenti vaiolature significative.
- Previa pulizia e con una buona illuminazione, le cricche sulla superficie dell'assile 4 (417326) sono visibili a occhio nudo.

5.1.3.2.4 Freni del carro 11

- È impossibile esprimersi sullo stato delle suole dei freni della sala 1 con la ruota fratturata, essendo andate completamente distrutte.
- Sulle suole dei freni LL ancora presenti non vi sono tracce riconoscibili di surriscaldamento.
- Entrambi i triangoli dei freni della sala 1 sono stati divelti dal rispettivo supporto in seguito alla rottura e allo spostamento della ruota e risultavano trattenuti sotto il carro soltanto dalle funi d'emergenza.

5.1.3.3 Carro 14

- Le quattro sale sono progettate per sopportare un carico per asse di 25 t. Tutte le misure del bordino (Sh, Sd, qR) coincidevano in larga misura con i valori a nuovo.
- Nonostante una breve corsa a freni bloccati tra la galleria del Ceneri e la stazione di Bellinzona, nessuna delle ruote presentava distacchi della vernice. Rispetto alle misurazioni dell'ultima manutenzione IS2, i valori delle tensioni residue delle ruote non risultavano superiori alla norma.
- I freni sono stati disinseriti alla stazione di Bellinzona.
- Tale operazione non ha avuto alcun influsso sul percorso del secondo assile in direzione del binario di raccordo.

5.1.3.4 Carri da 15 a 30

- I danni ai carri da 15 a 26 sono una conseguenza del deragliamento.
- Gli ultimi quattro carri del treno (carri 27–30) non sono deragliati e non hanno subito danni.

5.1.3.5 ECM, intervallo di manutenzione

- Non vi sono indicazioni di lacune nell'esecuzione della manutenzione che avrebbero potuto influenzare la dinamica dell'evento o causare l'incidente.

- L'intervallo massimo (660 000 km o 8 anni) tra l'ultima IS2 alla sala 1 (81987) e quella successiva non è stato superato.

5.1.4 Innesco delle cricche – cricche a fatica – rottura della ruota

- Le tensioni residue di trazione sulla superficie di rotolamento possono insorgere per effetto di deformazioni plastiche, microstrutture disomogenee o influssi termici. Tutte le ruote intatte esaminate non presentavano né deformazioni plastiche, causate da sollecitazioni in fase di rotolamento, né microstrutture disomogenee.
- L'unico fattore esterno che rimane è dunque il fatto che le tensioni residue sulla superficie della ruota si generino per effetto di un sovraccarico termico.
- In fase di movimento la superficie della ruota subisce un sovraccarico termico in caso di contatto prolungato con le suole dei freni; ciò può avvenire a causa di un freno bloccato o di un rilascio non completo dei freni.
- Nonostante tutte le tre sale intatte del carro 11 abbiano cicli di vita differenti dal punto di vista della percorrenza (chilometri percorsi) e le ruote anni di fabbricazione diversi, dall'esame metallurgico è emerso che tutte le ruote presentavano cricche con le medesime caratteristiche.
- Alla luce di quanto sopra, le prove supportano la conclusione dell'esame metallurgico, secondo cui un sovraccarico termico della superficie di rotolamento comporta la formazione di cricche.
- Le fessure verticali che si propagano dalla superficie di rotolamento come cricche a fatica sono difetti gravi che, col passare del tempo, possono sfociare in una rottura della ruota, se non individuate e trattate a uno stadio precoce.

5.1.5 Safety Management System FFS Cargo SA, eseguire il servizio di trasporto

Gli esiti del controllo effettuato in sede di preparazione del treno a Chiasso sono stati verbalizzati in vari documenti e quindi riportati nella parte alta della lista del treno 45016 (Figura 102). La produzione di prove con una trascrizione manuale, sintetica dei dati è suscettibile di errori.

5.2 Misure adottate dopo l'evento

Le misure note al SISI sono elencate qui di seguito senza commenti.

Nel suo rapporto finale dell'11 luglio 2024 la JNS Task Force «Accident Gotthard base tunnel – broken wheels», costituita il 24 ottobre 2023, formula tra i vari punti le conclusioni descritte qui di seguito.

- La forma della ruota BA 390 è analoga a quella del tipo BA 004. Altri quattro tipi di ruote (Db004-sa, Ri 025, R32, BA 304) sono stati identificati come analoghi. I provvedimenti atti a limitare i rischi in esercizio (diametro minimo delle ruote 880 mm), pubblicati il 28 luglio 2017 per le prime «JNS Broken wheels», valgono anche per questi tipi di ruote.
- Il JNS propone di aggiungere al Contratto uniforme d'utilizzazione dei carri merci (CUU) del 2024 le migliorie descritte di seguito finalizzate al controllo dei rischi.
 - Tracce di surriscaldamento: applicazione della definizione: definire il concetto di distacco significativo di vernice specificando «50 mm o maggiore».
 - Integrare nel CUU 2024 i provvedimenti da adottare successivamente all'individuazione di un surriscaldamento da parte dei sistemi di rilevamento sui binari.

6 Raccomandazioni di sicurezza

Conformemente all'articolo 26 della direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio dell'11 maggio 2016 sulla sicurezza delle ferrovie, le raccomandazioni sono indirizzate all'autorità nazionale preposta alla sicurezza e, se il loro carattere lo richiede, all'Agenzia, ad altri organismi o autorità dello Stato membro interessato o ad altri Stati membri.

Nell'ordinanza del 17 dicembre 2014 concernente le inchieste sulla sicurezza in caso di eventi imprevisti nei trasporti (OJET), stato 1° gennaio 2025 (RS 742.161), la legislazione svizzera prevede quanto segue rispetto alle raccomandazioni di sicurezza:

Art. 48 Raccomandazioni di sicurezza

¹ Il SISI rivolge le sue raccomandazioni di sicurezza al servizio responsabile della vigilanza. Se l'autorità di vigilanza è un'autorità federale, informa anche il dipartimento competente. In caso di problemi di sicurezza urgenti informa immediatamente il dipartimento competente.

^{1bis} Rivolge raccomandazioni di sicurezza ad autorità estere, se previsto da accordi internazionali.

² I destinatari delle raccomandazioni di sicurezza informano periodicamente il SISI sull'attuazione di tali raccomandazioni o sulle ragioni per cui hanno rinunciato a prendere misure.

^{2bis} Se il destinatario è un'autorità federale, quest'ultima informa anche il dipartimento competente.

^{2ter} Il SISI prende posizione sui rapporti di attuazione presentati dagli uffici federali. In merito ai rapporti di attuazione presentati dall'autorità federale può prendere posizione all'attenzione del dipartimento competente.

³ Il dipartimento competente può conferire all'ufficio federale competente mandati di attuazione di raccomandazioni di sicurezza.

Allo stesso tempo ogni ufficio, ogni impresa, ogni singola persona sono invitati, in merito alle raccomandazioni di sicurezza presentate, a ricercare un miglioramento della sicurezza nei trasporti pubblici.

Il SISI pubblica le risposte sul sito www.sisi.admin.ch, offrendo un quadro aggiornato riguardo all'attuazione della relativa raccomandazione di sicurezza.

6.1 Sale con soole dei freni LL, diametro minimo in esercizio

6.1.1 Deficit di sicurezza

Il rapporto finale pubblicato il 28 luglio 2017 dalla task force «JNS Broken Wheels» afferma che, per quanto riguarda le cricche nella corona delle ruote del tipo BA 004, in alcune applicazioni la probabilità che si sviluppino difetti indotti termicamente è maggiore. Sono stati definiti provvedimenti a breve e lungo termine per limitare i rischi durante l'esercizio e manutenzione delle sale montate e sono state presentate proposte di modifica a norme e ordinanze. Tra i provvedimenti adottati al fine di limitare i rischi in fase di esercizio, per i tipi di ruote BA 314 e BA 004 si è definito un diametro minimo di 880 mm.

Nel suo rapporto finale dell'11 luglio 2024 la JNS Task Force «Accident Gotthard base tunnel – broken wheels» formula tra i vari punti le conclusioni descritte di seguito.

- Il tipo di sala montata BA 390 è analogo al tipo BA 004. Altri quattro tipi di sale (Db004-sa, Ri 025, R32, BA 304) sono stati identificati come analoghi. I provvedimenti atti a limitare i rischi in esercizio (diametro minimo delle ruote 880 mm), pubblicati il 28 luglio 2017 per le prime «JNS Broken wheels», valgono anche per questi tipi di sale.
- Dall'analisi di 74 casi (Broken wheel - visual crack detection or cracks found by NDT Testing) relativi a vari tipi di sale emerge che ne sono stati registrati dieci perché causa della rottura di una ruota o perché, al controllo visivo, sono state individuate cricche nelle ruote. In tutti questi dieci casi le sale avevano un diametro delle ruote uguale o inferiore a 880 mm.

La ruota fratturata, oggetto del presente rapporto, aveva un diametro di 862 mm dopo l'ultima riprofilatura.

6.1.2 Raccomandazione di sicurezza n. 205

Il SISI raccomanda all'Agenzia dell'Unione europea per le ferrovie (ERA) di sollecitare gli ECM a estendere i provvedimenti di limitazione dei rischi in esercizio proposti dalla JNS Task Force a tutti i tipi di sale provviste di soles dei freni in materiale composito.

6.2 Esame a ultrasuoni della ruota, linee guida VPI

6.2.1 Deficit di sicurezza

Ad oggi le linee guida VPI definiscono i seguenti criteri per la manutenzione delle sale:

una volta raggiunta la percorrenza massima del gruppo di sale in questione (in questo caso 660 000 km), in ogni caso non oltre il superamento della durata massima di installazione previsto dal rispettivo gruppo di classificazione della sala (8 anni), le sale devono essere smontate e sottoposte a manutenzione.

Dall'ultima IS2 la sala con la ruota fratturata ha percorso all'incirca 173 000 km. La ruota fratturata non presentava segni di surriscaldamento o distacchi di vernice. Ciò nonostante, come evidenziano gli esiti dell'esame metallurgico, le tensioni residue di trazione presenti sulla superficie di rotolamento potrebbero aver notevolmente favorito, se non acconsentito, l'origine delle cricche. Nelle fasi successive le cricche, alimentate da carichi ciclici, si propagano ulteriormente se in loro prossimità sono presenti tensioni di trazione. Le elevate tensioni residue presenti sulla superficie di rotolamento sono considerate un fattore determinante per la formazione delle cricche. L'analisi comparativa delle tensioni residue mediante ultrasuoni (questa tecnica restituisce soltanto un valore medio localizzato della tensione residua nella corona della ruota) e diffrazione dei raggi X ha evidenziato che le misurazioni ultrasonografiche effettuate durante la manutenzione consentono solo in parte di formulare una conclusione in merito allo stato delle tensioni residue sulla superficie di rotolamento, per cui l'area della superficie di rotolamento determinante per l'enucleazione della cricca non può essere sufficientemente esaminata.

Le linee guida VPI-04 stabiliscono che, in fase di manutenzione delle sale montate (IS1 e IS2) va sempre effettuato un esame a ultrasuoni delle corone delle ruote e una misurazione delle tensioni residue mediante ultrasuoni. La manutenzione IS1 e IS2 è possibile soltanto previo smontaggio delle sale. Questa prassi sviluppata

e consolidata ormai da anni fu introdotta quando i carri merci erano ancora muniti di suole dei freni in ghisa grigia. Al giorno d'oggi le condizioni d'esercizio dei carri merci sono cambiate. La velocità dei treni merci è stata innalzata e le suole dei freni in ghisa grigia sono state sostituite da suole in materiale composito. L'introduzione di suole dei freni del tipo LL non ha comportato adeguamenti alle prescrizioni di manutenzione. Di conseguenza i controlli alle sale eseguiti secondo le specifiche di manutenzione odierne non sono in grado di rilevare a uno stadio precoce il rischio summenzionato – la formazione di cricche in seguito a eccessive tensioni residue sulla superficie della ruota.

6.2.2 Raccomandazione di sicurezza n. 206

Il SISI raccomanda all'Agenzia dell'Unione europea per le ferrovie (ERA) di sollecitare gli ECM ad adeguare i criteri relativi all'intervallo e alla tecnica di manutenzione delle sale provviste di suole dei freni in materiale composito.

6.3 Influsso delle suole dei freni in materiale composito attraverso la sollecitazione termica delle ruote

6.3.1 Deficit di sicurezza

In fase di movimento del veicolo la superficie della ruota subisce un sovraccarico termico in caso di contatto prolungato con le suole dei freni, il che può avvenire a causa di un freno bloccato o di un allentamento non completo dei freni.

Il documento pubblicato il 28 luglio 2017 dalla JNS Task Force «Broken Wheels» afferma che, per quanto riguarda le cricche sulla corona della sala BA 004, in alcune applicazioni la probabilità che si sviluppino difetti indotti termicamente è maggiore.

Come evidenzia lo studio svedese pubblicato nel 2021, le suole dei freni in materiale composito sono causa di una maggiore sollecitazione termica a carico della ruota. La distribuzione della temperatura sulla superficie di rotolamento non è uniforme, con hot spot evidenti e pressoché fissi lungo la circonferenza della ruota.

Nel suo progetto T963 «Miglioramento della vita utile delle sale montate attraverso una migliore comprensione delle cause di danneggiamento delle ruote» l'organismo indipendente di sicurezza, normazione e ricerca per la rete ferroviaria britannica (RSSB) cita il fatto che l'esposizione prolungata al calore dovuta a una brusca frenata che induce una sollecitazione termica sulla superficie di rotolamento può comportare un'inversione delle tensioni residue di compressione in tensioni di trazione, con conseguente improvviso cedimento catastrofico della ruota a causa della formazione di cricche.

Gli esiti dell'esame metallurgico sono giunti alla conclusione che la causa della formazione di cricche è stato un surriscaldamento della superficie di rotolamento. Le fessure verticali che si propagano dalla superficie di rotolamento come cricche a fatica sono difetti gravi che, col passare del tempo, possono sfociare in una rottura della ruota, se non individuate e trattate a uno stadio precoce. Nel caso di specie, sulla vernice in prossimità del disco e al di sotto della corona della ruota non sono stati trovati segni di surriscaldamento. Ciò nonostante, come evidenziano gli esiti dell'esame metallurgico, le tensioni residue di trazione presenti sulla superficie di rotolamento potrebbero aver notevolmente favorito, se non consentito, la formazione delle cricche.

Le caratteristiche di sale, ruote e ceppi dei freni sono parte integrante delle specifiche tecniche di interoperabilità (STI) per il sottosistema «Materiale rotabile-carri merci²⁰».

6.3.2 Raccomandazione di sicurezza n. 207

Il SISI raccomanda all'Agenzia dell'Unione europea per le ferrovie (ERA) di commissionare uno studio sull'influsso delle suole dei freni in materiale composito sulle sollecitazioni termiche a carico delle ruote.

6.4 Scambi Hydrostar

6.4.1 Deficit di sicurezza

Gli scambi Hydrostar sono provvisti di un attuatore idraulico che trasferisce le forze di deviazione in maniera idraulica a tutte le chiusure centrali e di punta. In questa configurazione i fermascambi e i tiranti di accoppiamento degli aghi, che fungono da back-up per le chiusure di punta, sono posizionati sopra lo spigolo superiore della traversa.

Se un elemento di un carro o di un assile deragliato pende sotto lo spigolo superiore della rotaia, vi è il rischio che entri in contatto con la chiusura di punta o il tirante di accoppiamento degli aghi e infine danneggi o persino strappi dalla sede i componenti.

Di conseguenza gli aghi dello scambio, non più fissati in posizione, possono muoversi per effetto delle vibrazioni dinamiche generate dal passaggio dei treni. Gli scambi non chiusi sono causa di deragliamenti.

6.4.2 Raccomandazione di sicurezza n. 208

Il SISI raccomanda all'Ufficio federale dei trasporti (UFT) di sollecitare i gestori delle infrastrutture, che sulla loro rete operano scambi con elementi di chiusura posizionati sopra lo spigolo superiore delle traverse o che prevedono di utilizzarli, a valutare o ridurre il rischio di un danneggiamento meccanico dei tiranti di accoppiamento degli aghi e dei fermascambi centrali posizionati sopra lo spigolo superiore della traversa in correlazione con una mancata chiusura degli scambi.

²⁰ Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, regolamento (UE) n. 321/2013

7 Avviso di sicurezza

Facendo seguito ai deficit di sicurezza riscontrati durante l'inchiesta, il SISI può pubblicare avvisi di sicurezza. Queste avvertenze sono emanate quando una raccomandazione di sicurezza di cui alla direttiva (UE) 2016/798 non è ritenuta opportuna, non è possibile da un punto di vista formale o quando il carattere più informale dell'avvertenza ne rende più probabile una sua maggiore efficacia. La base giuridica degli avvisi di sicurezza del SISI è costituita dall'articolo 56 OIET:

Art. 56 Informazioni relative alla prevenzione di incidenti

Il SISI può elaborare e pubblicare informazioni generali utili per la prevenzione di incidenti.

7.1 Safety Management System FFS Cargo SA, sezione Preparazione del treno

7.1.1 Deficit di sicurezza

Il manuale per il servizio tecnico dei veicoli regola i compiti dei CTC, l'ispezione tecnica dei carri e i provvedimenti da adottare in caso di irregolarità del carro e descrive lo standard di qualità universale. Il manuale stabilisce che, in caso di irregolarità del carro, il CTC è tenuto a documentare i danni mediante tablet elettronico.

Gli esiti del controllo effettuato in sede di preparazione del treno a Chiasso sono stati verbalizzati in vari documenti e quindi trascritti nella parte alta della lista del treno 45016. Una verbalizzazione manuale, sintetica dei dati su un documento probatorio, atto a certificare la conformità al processo, non è ottimale, essendovi la possibilità di commettere errori in fase di trascrizione.

7.1.2 Avviso di sicurezza n. 54

Destinatari: FFS Cargo SA

Per garantire uno standard di qualità universale, FFS Cargo SA dovrebbe verbalizzare gli esiti del controllo tecnico e della preparazione del treno in un unico documento, senza necessità di trascrizioni.

Il presente rapporto finale è stato approvato dalla Commissione del Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza (SISI) (art. 10 lett. h dell'ordinanza del 17 dicembre 2014 concernente le inchieste sulla sicurezza in caso di eventi imprevisti nei trasporti).

Berna, 27. Mai 2025

Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza

Allegato 1

Composizione del treno con numeri dei carri

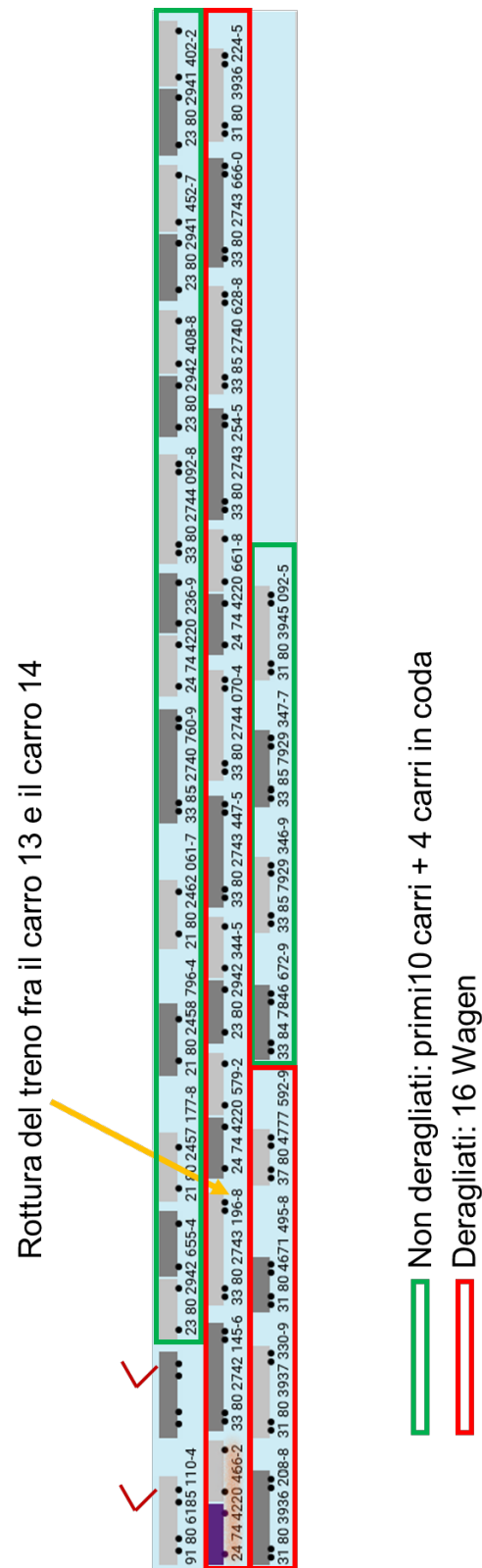


Figura 92: Composizione del treno 45016 (fonte: ICT FFS, integrazioni SISI).

Allegato 2

Rapporti di carico tra le ruote ICT-RLC di Claro – carro 11 (carro 466-2), assile 1

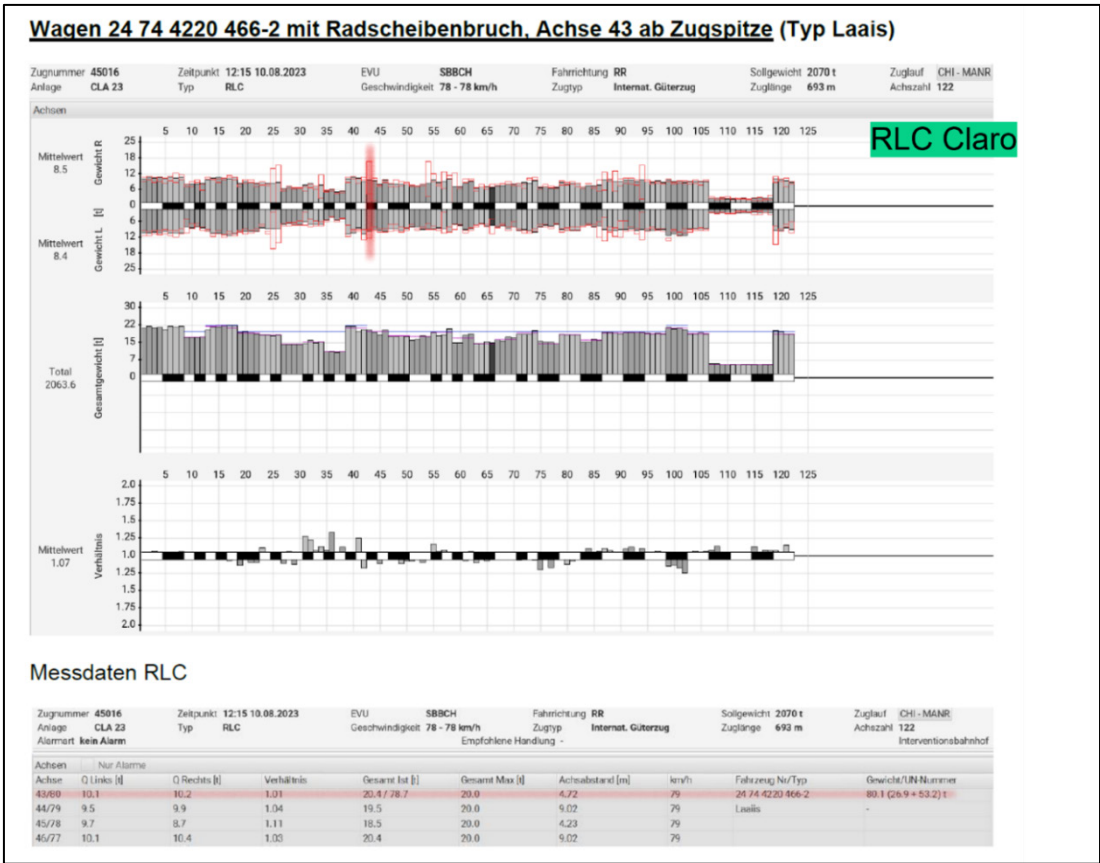


Figura 93: Registrazione dei rapporti tra le ruote ICT-RLC di Claro, treno 45016, data 10.08.2023.

Forza di appoggio delle ruote ICT-RLC di Claro – carro 11 (carro 466-2), assile 1



Figura 94: Registrazione ICT delle forze di appoggio delle ruote: RLC di Claro, treno 45016, data 10.08.2023.

Valori d'allarme:

per far scattare un allarme, dev'esserci un rapporto di carico tra le ruote $\geq 1.7:1$ o una forza dinamica sulla ruota ≥ 40 t.

Allegato 3

Registrazione ICT a Claro

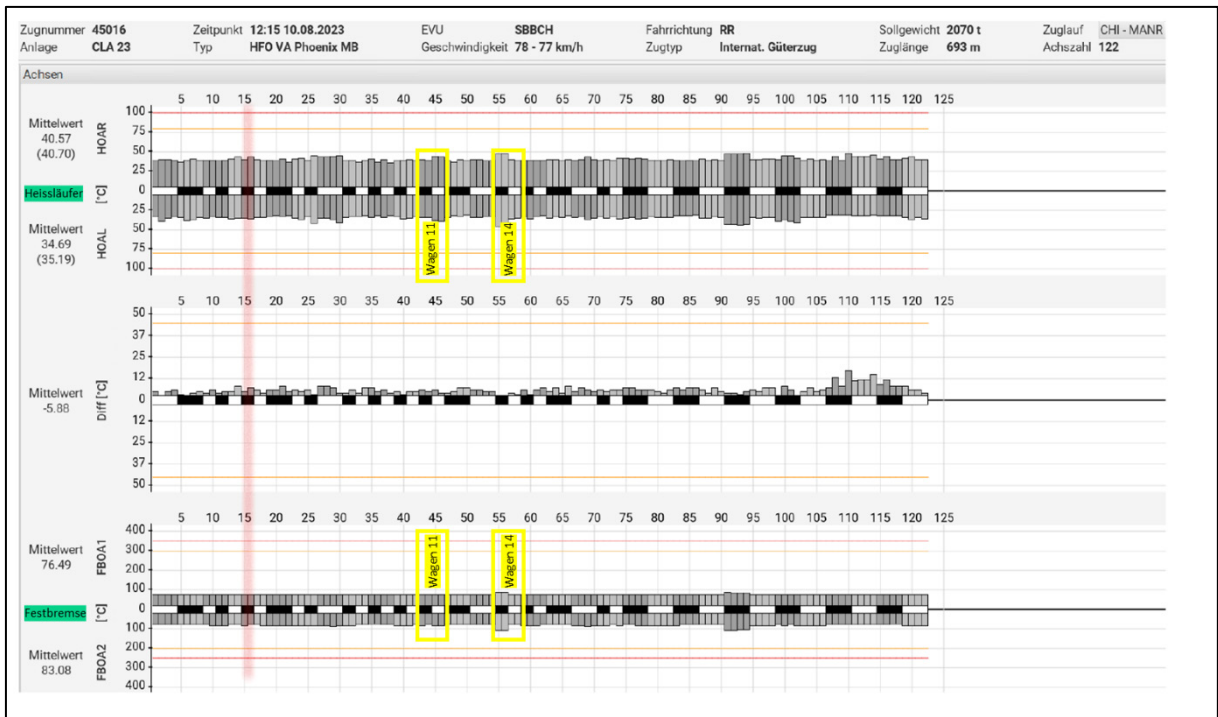


Figura 95: Registrazione ICT–HFO di Claro, treno 45016, data 10.08.2023.

Linee rosse e arancioni: valori limite d’allarme secondo allegato 4, HFO

Allegato 4

Descrizione degli impianti di controllo dei treni (ICT)

Sulla rete a scartamento normale delle Ferrovie svizzere sono presenti molteplici sistemi di diversa natura appartenenti agli impianti di controllo dei treni (ICT). Il loro compito è effettuare misurazioni sui treni in transito, reagire in caso di anomalie con messaggi d'allarme e quindi fornire un contributo importante alla sicurezza del traffico ferroviario.

Qui di seguito vengono descritti soltanto i sistemi di monitoraggio correlati all'evento in questione.

- Impianto per la localizzazione delle boccole surriscaldate e dei freni bloccati (HFO)
- Checkpoint del carico per ruota (RLC)

Il centro d'intervento di Erstfeld ha il compito di analizzare le segnalazioni pervenute e di adottare provvedimenti in caso di allarme. Determinati allarmi si attivano in automatico e vengono contemporaneamente trasmessi al capomovimento di competenza.

I dati elettronici raccolti vengono salvati e, dopo un incidente, possono eventualmente essere analizzati in dettaglio.

Impianto per la localizzazione delle boccole surriscaldate / dei freni bloccati (HFO)

Descrizione

Gli HFO rilevano boccole surriscaldate e freni bloccati sui treni in transito. Gli impianti sono provvisti di sensori a infrarossi per la misurazione della temperatura.

Valori limite d'allarme

I valori limite d'allarme sono definiti come segue:

Boccole surriscaldate, allarme per differenza	$\geq 45\text{ °C}$
Boccola surriscaldata	$\geq 100\text{ °C}$
Boccola calda	$\geq 80\text{ °C} < 100\text{ °C}$
Freno bloccato surriscaldato	$\geq 250\text{ °C}$
Freno a disco bloccato	$\geq 350\text{ °C}$
Freno bloccato, allarme di tendenza freno a ceppi	$\geq 200\text{ °C} < 250\text{ °C}$

Checkpoint del carico per ruota (RLC)

Descrizione

Questo sistema era stato originariamente sviluppato come «pesa a ponte». Misura a livello statico e dinamico i carichi per ruota dei treni in transito.

Il checkpoint del carico per ruota verifica allo stesso tempo la forza di appoggio delle ruote e il rapporto fra i carichi delle ruote sinistra-destra, al fine di controllare la distribuzione del carico sulle ruote. La forza di appoggio delle ruote è un indicatore dello stato della ruota di un veicolo e consente di individuare ovalizzazioni o danni alla sua superficie di rotolamento così come sfaccettature che possono lesionare l'infrastruttura o causare danni conseguenti al materiale rotabile. Non appena sulla superficie di rotolamento di una ruota si forma un'evidente sfaccettatura, il coefficiente dinamico aumenta.

Estratto dal manuale sugli impianti di controllo dei treni²¹:

Con l'RLC si ottengono le seguenti misurazioni e i benefici descritti di seguito.

- Carichi per ruota e asse
Prevenzione di sovraccarichi ai danni dell'infrastruttura (ad es. vecchi ponti in acciaio), ma anche prevenzione di rotture di assili per sovraccarico con conseguente possibile deragliamento.
- Rapporto fra i carichi delle ruote sinistra/destra.
Prevenzione di deragliamenti ed eventualmente anche di violazioni del profilo in seguito allo spostamento di carichi o a un caricamento errato.
- Ovalizzazioni delle ruote e danni ai carrelli
Prevenzione di sovraccarichi ai danni dell'infrastruttura e di deragliamenti dovuti a danni alle ruote o ai carrelli (rottura o spostamento di molle, bulloni mancanti, sfaccettature critiche per la sicurezza). Le sfaccettature causano inoltre una significativa perdita di comfort per i viaggiatori e, in alcuni casi, un forte disturbo acustico per i residenti locali. Anche le vibrazioni in aziende ubicate nelle vicinanze dei binari possono essere estremamente moleste.
- Peso totale del treno, riconciliazione con i dati corrispondenti in ZIS-Infra
Prevenzione di casi di segnali inosservati o collisioni in seguito a calcoli di frenatura errati.
- Valori limite d'allarme o valori di guardia
Sono stati stabiliti i seguenti valori limite d'allarme e di guardia:
 - **Valori limite d'allarme**
Rapporto fra i carichi assiali $\geq 1.7:1$ e carico dell'asse ≥ 10 t
Carico dell'asse ≥ 25 t
Difetto alle ruote forza din. alla ruota ≥ 40 t
Peso del treno scostamento ≥ 20 % (misurazione – dati ZIS)
In caso di allarme il macchinista procede a una velocità massima di 60 km/h verso la stazione d'intervento successiva e ferma il treno.
 - **Valori di guardia**
Rapporto fra i carichi assiali $\geq 1.6:1$ e carico dell'asse ≥ 10 t
Carico dell'asse ≥ 24 t
Difetto alle ruote forza din. alla ruota ≥ 30 t
Gli annunci d'avvertimento vengono generati automaticamente come mail e trasmessi alle ITF, affinché li trattino e di norma adottino i provvedimenti del caso alla stazione termine.

Tutti i carri vengono misurati e rilevati dal sistema. In caso di carri vuoti o con un carico per asse inferiore a 10 t, tuttavia, anche al superamento del rapporto fra carichi assiali di 1:1.7 non vengono attivate segnalazioni di monitoraggio automatiche.

²¹ Fonte: Regolamento FSS, I-50099, IB 50/18, manuale sugli impianti di controllo dei treni, versione 7-0, valido dall'01.07.2018

Allegato 5

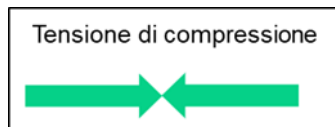
Tensioni residue: spiegazione semplificata

Definizione:

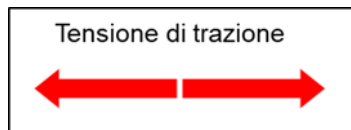
Le tensioni residue sono tensioni meccaniche presenti all'interno di un componente su cui non agiscono forze esterne. Possono essere causate da deformazioni plastiche, una microstruttura disomogenea o influssi termici.

Le tensioni residue contribuiscono in misura determinante allo stato tensionale di un componente e si sovrappongono alle tensioni d'esercizio.

Semplificando, la differenza tra una tensione residua di compressione e una di trazione può essere brevemente spiegata come segue:



Le tensioni residue di compressione sulla superficie migliorano la resistenza alla fatica. Devono infatti essere innanzitutto «superate» prima che possano generarsi cricche a fatica.



Le tensioni residue di trazione peggiorano invece la resistenza alla fatica; agiscono sui componenti come ulteriore precarico.

Fatica: spiegazione semplificata

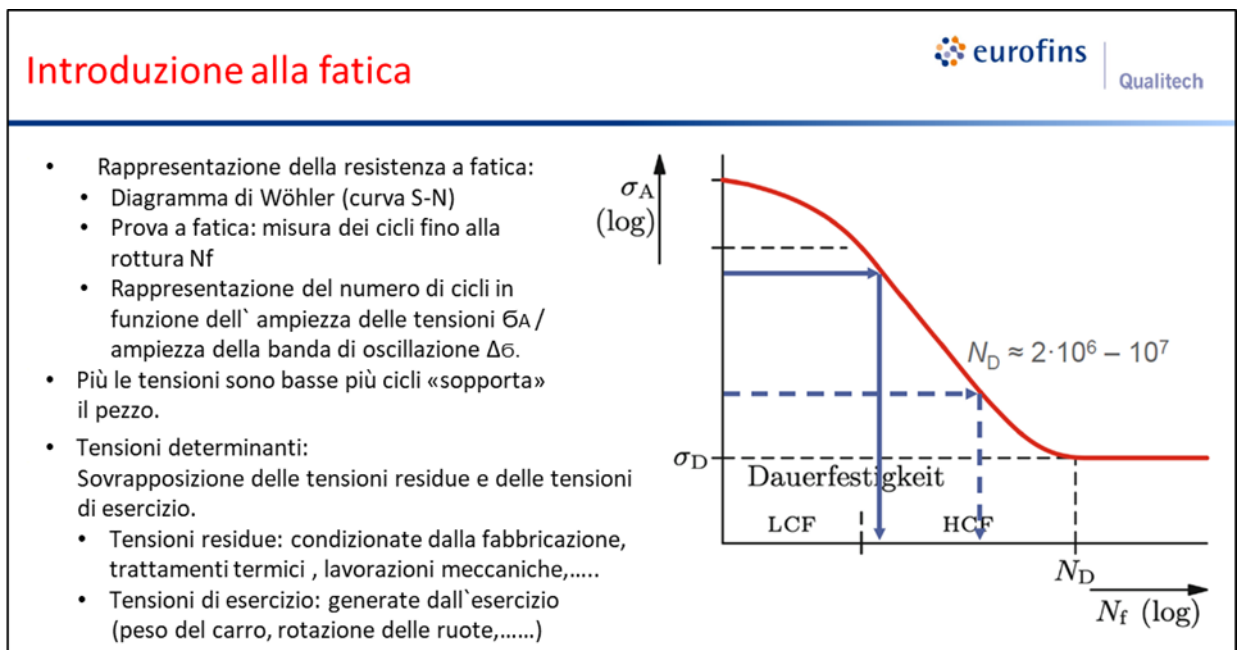


Figura 96: Spiegazione di resistenza a fatica e tensione residua.

Allegato 6

Immagini al microscopio della ruota intatta e della ruota fratturata



Figura 97: Immagine al microscopio ottico della superficie di rotolamento intatta della sala 3, ruota sinistra.

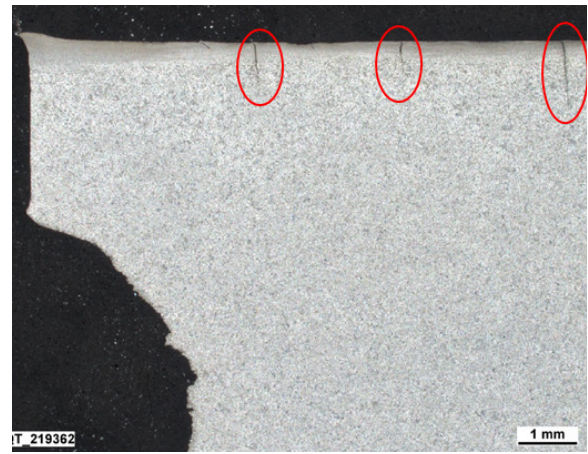


Figura 98: Immagine al microscopio ottico della ruota fratturata della sala 1.

Confronto tra le analisi metallografiche delle cricche

Fatica per sollecitazione da rotolamento e cricca perpendicolare alla superficie di rotolamento.



Figura 99: Immagine al microscopio ottico della superficie di rotolamento intatta della sala 3: cricca originatasi sulla superficie di rotolamento e a propagazione più o meno verticale rispetto alla superficie, senza fatica per sollecitazione da rotolamento.

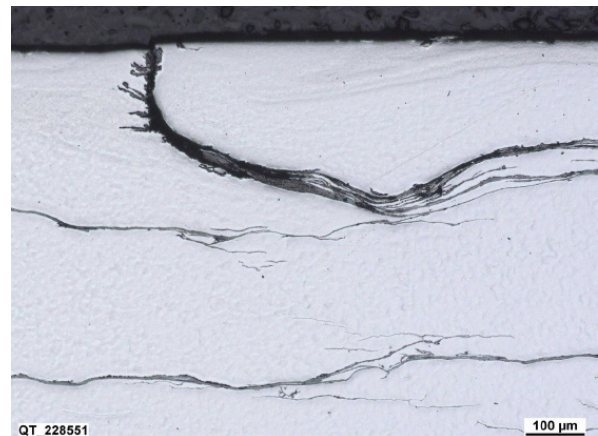


Figura 100: Immagine al microscopio ottico con fatica per sollecitazione da rotolamento.

Le cricche a fatica (Figura 100) parallele alla superficie sono fenomeni noti sulle ruote. Si tratta di un danno tipicamente riconducibile a una sollecitazione da rotolamento.

Allegato 7

Norma EN 13262 Applicazioni ferroviarie – Sale montate e carrelli – Ruote – Requisiti del prodotto, versione 2020.

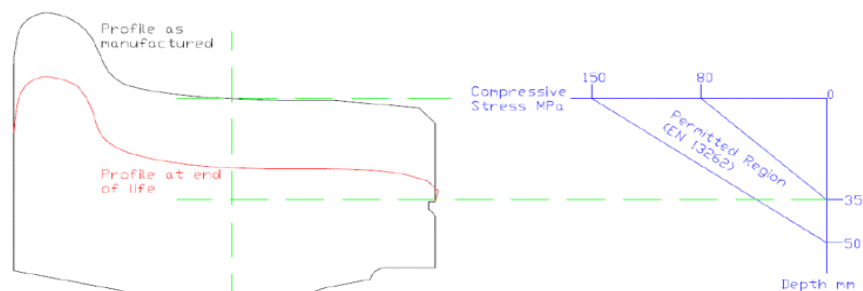
Estratto

Tensione residua di compressione lungo la circonferenza, in prossimità della superficie di rotolamento

4.5.2 Valori da raggiungere

Le tensioni residue in direzione della circonferenza σ_{crs} vicino alla superficie della ruota devono essere di compressione con $\sigma_{crs} \leq -80$ MPa. Quando le tensioni residue di compressione in direzione della circonferenza sulla superficie della ruota sono inferiori a -200 MPa, deve essere fornita la prova che il livello risultante delle tensioni radiali residue nel disco della ruota siano ammissibili.

Le tensioni residue in direzione della circonferenza devono essere di compressione lungo tutta la superficie di rotolamento.



EN 13262: Requirement Compressive residual stresses in a wheel

Figura 101: Tensione residua di compressione in una ruota.
(*Compressive residual stress* (EN) – tensione residua di compressione (IT))

Allegato 8

Esiti degli esami metallurgici – resoconto integrale

5. Discussione e conclusioni

Gli esami visivi e al microscopio elettronico a scansione delle superfici di frattura della ruota incidentata hanno evidenziato la presenza di cricche a fatica in tutti i frammenti e nella porzione di ruota residua. Tali fratture si sono formate sulla superficie di rotolamento per poi propagarsi perpendicolarmente a essa all'interno del materiale, il che equivale, rispetto alla ruota, a una propagazione di tipo radiale. Soltanto nel disco, con l'aumentare della distanza dalla superficie di rotolamento, le cricche si sono in parte ramificate, assumendo un orientamento tangenziale. Né le indagini al microscopio elettronico a scansione né le indagini metallografiche delle aree di enucleazione delle cricche hanno evidenziato difetti nel materiale che avrebbero potuto favorire il loro innesco.

Le indagini condotte sulla seconda ruota del medesimo assile hanno evidenziato anche su di essa la presenza di cricche, propagate in parte su un'ampia area del disco. L'indagine frattografica ha confermato che si tratta anche in questo caso di cricche a fatica, originatesi sulla superficie di rotolamento. La morfologia del danno è dunque identica a quella della ruota fratturata, per cui si presume che anche questa ruota avrebbe potuto cedere un domani se fosse rimasta in esercizio.

Dalle analisi visive e metallografiche è risultato che, oltre alle superfici di frattura esaminate, vi sono numerose altre cricche formatesi sulla superficie di rotolamento e anch'esse propagate più o meno perpendicolarmente all'interno del materiale. Potrebbe trattarsi di ulteriori cricche a fatica, con una crescita tuttavia meno marcata.

Le cricche a fatica si formano per effetto di sollecitazioni meccaniche e termiche cicliche verificatesi in fase di esercizio (carico di fatica). La rotazione delle ruote durante la corsa del treno genera, in prossimità della superficie di rotolamento, un carico meccanico ciclico, dove un ciclo corrisponde a un giro completo della ruota. Successivamente, in fase di frenata l'attrito tra la suola del freno e la superficie di rotolamento produce calore. Il conseguente aumento di temperatura comporta, a livello localizzato, una dilatazione della ruota in prossimità della superficie di rotolamento. Questa zona tornerà successivamente a raffreddarsi, in particolare grazie alla dissipazione del calore attraverso la corona e il disco della ruota. Ogni frenata determina pertanto una dilatazione e successiva contrazione dell'area della superficie di rotolamento. Questi processi rappresentano una sollecitazione termo-meccanica ciclica e influiscono sul materiale.

Se esposti a carichi termici e/o meccanici ciclici, tutti i materiali metallici hanno una resistenza non infinita, ed è importante sottolineare che i carichi sopportabili in regime di sollecitazione ciclica sono notevolmente inferiori a quelli tipici di una situazione statica. Nello specifico, il numero di cicli sopportabili è inversamente proporzionale all'entità delle sollecitazioni. Alcuni metalli, come l'acciaio utilizzato per le ruote, possiedono a livello fenomenologico un valore limite per le tensioni applicate – la cosiddetta resistenza a fatica – al di sotto del quale non si deve tener conto che durante la vita utile del componente si formino fessure da fatica. Una sala montata va quindi progettata in maniera tale che i carichi ciclici attesi in fase di esercizio non superino la resistenza a fatica. Il nesso tra tensione ciclica e numero di cicli sopportabili è sintetizzato nei diagrammi di Wöhler o della resistenza a fatica.

Viceversa si può pertanto concludere che la presenza di cricche da fatica sulla superficie di frattura indica che la resistenza ciclica del materiale dev'essere stata superata. Visto che dalle indagini frattografiche è emerso chiaramente che le cricche hanno avuto origine sulle superfici di rotolamento, è d'obbligo esaminare più approfonditamente lo stato del materiale in questa zona. Devono dunque esserci state delle condizioni tali da favorire o consentire la formazione di cricche. La presenza di numerose superfici di frattura di identica morfologia e di svariate

altre cricche che partono dalla superficie di rotolamento evidenzia che si tratta di un fenomeno sistematico, non riconducibile a singoli difetti del materiale.

La formazione di cricche a fatica nei materiali metallici avviene per la presenza di un movimento di dislocazione già al di sotto del limite di snervamento. Nei metalli le dislocazioni che, seppur minime, possono verificarsi nel corso di un ciclo di carico, sono causa di deformazione plastica. Il presupposto affinché ciò avvenga è che sulla superficie del materiale siano presenti sollecitazioni di trazione tali da indurre un movimento di dislocazione. Sebbene in un singolo ciclo la deformazione plastica indotta da un movimento di dislocazione sia minima, col susseguirsi dei cicli queste deformazioni possono accumularsi a tal punto da poter innescare un principio di cricca. Sulla superficie si formano dunque dei minuscoli intagli che possono dare origine a incrinature destinate a propagarsi all'interno del materiale. Nei provini lisci, spesso la formazione di incrinature iniziali richiede parecchio tempo, soprattutto quando la superficie è liscia e il carico è notevolmente inferiore al limite elastico. In tal caso, la formazione di incrinature iniziali impiega buona parte della vita utile di un componente.

Non appena sulla superficie del componente si formano le prime incrinature, alla loro estremità l'effetto intaglio provoca un'intensificazione degli sforzi. All'apice delle cricche, quest'ultima genera tensioni relativamente elevate a livello locale, con la formazione di una zona plastica che, se sollecitata a trazione, innesci una minima propagazione della cricca. Nel momento in cui il materiale non è più sotto carico, la cricca si richiude e la dilatazione elastica all'apice della cricca si riduce. Visto l'effetto delle sollecitazioni cicliche sulla propagazione delle cricche, nelle fasi successive queste ultime continuano ad avanzare leggermente ogni qualvolta nell'area circostante sono presenti tensioni di trazione. Ciò significa che, ad ogni ciclo, la cricca avanza di un piccolo tratto, propagandosi perpendicolarmente alla massima tensione normale presente nel materiale.

Oltre alle tensioni d'esercizio, nel materiale sono presenti delle tensioni residue. Per tensioni residue s'intendono le tensioni presenti all'interno di un componente senza l'applicazione di forze esterne. Esse si generano in fase di produzione e sagomatura di un componente per effetto dei trattamenti termici, ma anche durante l'esercizio può verificarsi una variazione dello stato tensionale residuo in seguito alle sollecitazioni applicate. Le tensioni residue si sovrappongono ai carichi indotti in fase di esercizio e devono anch'esse essere tenute in considerazione nel valutare l'innescio delle cricche. Secondo i requisiti previsti dalla norma EN 13262 il trattamento termico di una ruota deve generare tensioni residue di compressione ($\sigma_{CTS} \leq -80 \text{ Mpa}$) lungo la circonferenza della corona. Le tensioni residue sono massime in corrispondenza della superficie di rotolamento e diminuiscono progressivamente verso il disco, dato che sull'intero volume di un componente tutte le tensioni residue si compensano a vicenda, azzerandosi.

In un componente sottoposto a sollecitazioni cicliche, le tensioni residue di compressione migliorano la resistenza a fatica, dal momento che occorre innanzitutto superarle prima che si generino le tensioni di trazione necessarie all'enudeazione di una cricca. Le tensioni residue che si generano all'interno della corona mirano pertanto a prevenire la formazione di cricche a fatica. Le tensioni residue di trazione, come un precarico sul materiale, si sommano invece alle sollecitazioni in esercizio.

Dalle misurazioni delle tensioni residue mediante diffrazione dei raggi X e rumore di Barkhausen è risultato che la superficie di rotolamento presenta stati tensionali residui molto differenti tra loro a livello locale. Oltre alle tensioni residue di compressione, sulla superficie è stata dimostrata anche la presenza di elevate tensioni residue di trazione. Le analisi metallografiche hanno inoltre rilevato, nelle immediate vicinanze della posizione di misurazione delle tensioni residue di trazione, la presenza di cricche, che sostanzialmente consentono al materiale di rilassarsi e di abbattere le tensioni residue. Alla luce di ciò e tenendo conto che anche il cedimento della ruota ha influito sulle tensioni residue, è probabile che le tensioni residue effettivamente presenti sulla superficie di rotolamento fossero ancora più elevate.

Le tensioni residue di trazione presenti sulla superficie di rotolamento potrebbero aver notevolmente favorito, se non consentito, la formazione delle cricche. Sebbene le tensioni residue diminuiscano con l'aumentare della profondità, per l'innescò delle prime incrinature iniziali è determinante l'area direttamente adiacente alla superficie. Non appena compaiono le prime incrinature iniziali, infatti, l'intensificazione degli sforzi (intensità di tensione elevate a livello locale) al loro apice promuove in misura determinante l'accrescimento e l'ulteriore propagazione delle cricche. Di conseguenza le elevate tensioni residue presenti sulla superficie di rotolamento sono considerate un fattore determinante per la formazione delle cricche.

Per gli acciai la resistenza a fatica è solitamente compresa tra $0.35 \dots 0.65 \times R_m$ (la resistenza a trazione), nel caso in cui la resistenza sia inferiore a 1400 MPa. La resistenza a trazione rilevata nella corona della ruota incidentata è mediamente pari a circa 850 MPa, per cui si può ipotizzare una resistenza a fatica compresa tra 300 e 550 MPa. Le tensioni residue misurate sulla superficie di rotolamento, pari a 370 MPa, rientrano in questo intervallo. Per quanto riguarda il disco della ruota, la EN 13262 stabilisce che dev'essere in grado di sopportare un'ampiezza di oscillazione σ pari a 360 o 450 MPa con una probabilità di sopravvivenza del 99.7% senza formazione di cricche (per una rugosità superficiale massima R_a di 6.3 μm). Pur considerando il fatto che i valori riguardano il disco e non la superficie di rotolamento, essi forniscono comunque un'indicazione in merito alla resistenza a fatica che può essere applicata in sede di progettazione. L'ampiezza delle oscillazioni è la differenza tra la tensione massima e minima di un carico ciclico. A seconda del carico (espresso dal coefficiente R) varia la tensione di trazione applicata sul componente. Per un valore R pari a -1 si ha un cosiddetto carico alternato in cui le tensioni di trazione e compressione coincidono e sono soltanto di segno opposto ($\sigma_u = -\sigma_o$). In ultima analisi, ciò significa che in questo caso le tensioni di trazione effettivamente applicate sono la metà dei valori specificati nella norma (180 o 225 MPa). In base alle specifiche della norma e per lo scenario di carico in esame, le tensioni residue di trazione presenti sulla superficie di rotolamento sono dunque superiori al valore di resistenza a fatica applicato in sede di progettazione. Da ciò si desume che molto probabilmente le tensioni residue di trazione, unite alle sollecitazioni in esercizio, hanno comportato il superamento della resistenza a fatica, il che può spiegare la formazione della cricca.

Nell'area prossima alla superficie le tensioni residue di compressione presenti originariamente nella corona della ruota si riducono per effetto della sollecitazione da rotolamento indotta in fase di esercizio. Si ha inoltre una minima asportazione di materiale dovuta all'usura che, sommata all'effetto appena descritto, fa sì che le tensioni residue di compressione diminuiscano costantemente durante l'esercizio. Tali processi, tuttavia, non bastano da soli a spiegare l'innescò delle cricche nel caso di specie, altrimenti ci si dovrebbe aspettare un numero notevolmente maggiore di ruote con simili danni.

Un altro fattore di cui tenere conto, che influisce sullo stato tensionale residuo della superficie di rotolamento, è la frenata: durante tale processo si genera una notevole quantità di calore, che viene dissipato attraverso il contatto ruota-rotaia e la corona della ruota. Il materiale pertanto si riscalda per poi tornare a raffreddarsi rapidamente. In particolare, le frenate brusche o gli impianti del freno che frenano in modo non uniforme lungo il treno (causando frenate più brusche in alcuni carri) comportano un rilassamento delle tensioni residue di compressione originariamente presenti. È noto in letteratura che gli shock termici ciclici, ossia il forte riscaldamento dell'area prossima alla superficie per un breve lasso di tempo, portano alla riduzione delle tensioni residue di compressione e allo sviluppo di quelle di trazione. In rari casi, o a fronte di un numero sufficientemente elevato di cicli termici, possono verificarsi anche cricche da shock termico. Sebbene sulla vernice presente nell'area del disco e sotto la corona della ruota non siano stati rivenuti segni di vernice bruciata quale indizio di un grave surriscaldamento, i processi in fase di frenatura vengono ritenuti determinanti per lo sviluppo di tensioni residue di trazione localizzate sulla superficie di rotolamento.

L'analisi comparativa delle tensioni residue mediante ultrasuoni e diffrazione dei raggi X ha evidenziato che le misurazioni ultrasonografiche effettuate durante la manutenzione consentono solo in parte di formulare una conclusione in merito allo stato delle tensioni residue

direttamente sulla superficie di rotolamento, per cui l'area della superficie di rotolamento determinante per l'enucleazione della cricca non può essere sufficientemente esaminata.

Dall'esame delle superfici di frattura è risultato che la stragrande maggioranza delle cricche generatesi in fase di esercizio presentavano una superficie ossidata. L'indagine al microscopio elettronico a scansione ha evidenziato in parte un evidente sfregamento delle superfici, il che significa che i due fianchi delle cricche, in fase di propagazione, sono stati ripetutamente premuti l'uno contro l'altro, rimanendo a contatto tra loro. Potrebbe dunque trattarsi di ossidi prodotti meccanicamente in seguito a ossidazione da sfregamento (fretting). Un altro elemento da considerare è la possibilità che le superfici delle cricche si corrodano per effetto dell'esposizione a influssi ambientali (ossigeno atmosferico e umidità), formando anche in tal caso ossidi. In entrambi le ipotesi si suppone che la formazione di ossidi si sia protratta per un lungo periodo di tempo, il che a sua volta significa che le cricche hanno continuato a propagarsi almeno per diversi mesi prima che si verificasse il cedimento catastrofico. A causa del grave danneggiamento secondario delle superfici di frattura, tuttavia, non è più possibile determinare l'esatta durata della propagazione delle cricche.

Come nel caso, ad esempio, di cuscinetti volventi o ingranaggi – oltre che delle ruote di un treno – la vita utile di un componente esposto a sollecitazione da rotolamento è anch'essa limitata dalla fatica.

La tensione di taglio ortogonale generata dalla pressione hertziana tra due superfici curve raggiunge un picco massimo al di sotto della superficie di contatto. Tale tensione di taglio ha un andamento ciclico ed è responsabile della formazione di cricche a fatica sotto la superficie. Con la crescita, le cricche si propagano inizialmente in parallelo rispetto alla superficie, per poi cambiare direzione e orientarsi verso quest'ultima, il che a livello macroscopico è causa di distacchi sulle superfici di rotolamento. Questa morfologia di danno è nettamente diversa da quella responsabile del cedimento delle ruote: nel caso di specie, sia la ruota fratturata che la seconda ruota presentano cricche a fatica che partono dalla superficie, per poi propagarsi nel materiale perpendicolarmente a essa.

La lega ER7 utilizzata è un acciaio non legato con un tenore di carbonio pari a max. 0.52% in peso. La composizione chimica della ruota fratturata è conforme alle specifiche della norma EN 13262 e, come tale, prevede un materiale che allo stato normalizzato possiede una struttura ferritico-perlitica costituita prevalentemente da perlite. Le posizioni esaminate nella parte inferiore delle corone (lontano dalla superficie di rotolamento) delle due ruote della sala 81987 (n. 1) sono pertanto in linea con le aspettative nei confronti dell'acciaio utilizzato.

La microstruttura sottostante la superficie di rotolamento risulta modificata in seguito all'uso, sui bordi delle sezioni attaccate chimicamente si vedono le cosiddette zone marrone e bianche.

Le definizioni si riferiscono all'aspetto osservato al microscopio ottico dopo che le superfici sono state attaccate chimicamente. In seguito alla ripetuta sollecitazione da rotolamento, il materiale subisce una deformazione plastica e la struttura ferritico-perlitica presente in origine si spezza. Le lamelle di perlite si trasformano progressivamente in carburi globulari, con un conseguente aumento della durezza. A uno stadio avanzato, nella microstruttura si osserva al microscopio ottico la formazione di un componente pressoché privo di struttura con una durezza molto elevata, che per esperienza risulta essere estremamente fragile e suscettibile di cricche. L'incremento della durezza in prossimità della superficie di rotolamento è stato dimostrato mediante opportune misurazioni effettuate sul frammento grande, nelle vicinanze degli inneschi di frattura, e sulla seconda ruota. L'aspetto dei provini esaminati dal punto di vista della loro microstruttura è in linea con le aspettative nei confronti di una ruota usata.

Le proprietà meccaniche determinate nella prova di trazione e resilienza hanno dimostrato che i requisiti previsti dalla norma EN 13262 sono stati in parte disattesi, sebbene gli scostamenti non siano molto importanti e non dovrebbero aver avuto un impatto significativo sull'innesco e sulla propagazione delle cricche. I valori di durezza determinati sulla sezione radiale della corona della ruota sono conformi alle specifiche della norma EN 13262.

Controllo del treno a Chiasso

Figura 102: Verbale di controllo del treno 45016, carri 1–27 (fonte: SBBC, elaborato dal SISI [nomi resi illeggibili]). I cerchi in rosso, carro 11 e 14, sono stati segnati dopo l'evento.

Allegato 10

Esempio di scambio con chiusura a nottolino

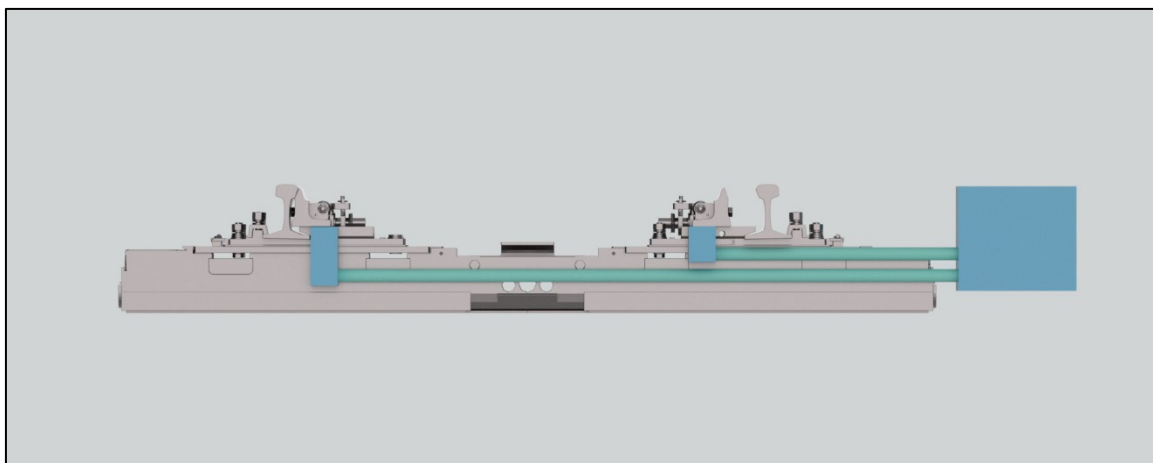


Figura 103: Esempio di scambio con chiusura a nottolino.