

“Politecnico di Milano”

Corso di laurea di Ingegneria Civile
orientamento “Infrastrutture viarie”



“ I difetti dei binari ”

Relatore: prof. Giandomenico Cassano

Tesi a cura di:

Andrea Badiali

matr. 787508

Indice

ABSTRACT	7
ABSTRACT	8
1. Introduzione	9
2. Metallurgia	10
2.1. Composizione di base	10
2.2. Struttura metallica	11
2.3. Formazione della microstruttura	12
2.3.1. Le allotropie dell'acciaio	15
2.3.1.1. Austenite	15
2.3.1.2. Ferrite.....	16
2.3.1.3. Cementite.....	16
2.3.1.4. Perlite	17
2.3.1.5. Martensite.....	17
2.3.1.6. Bainite	18
2.4. Diagrammi di stato	19
2.4.1. Regola delle fasi	21
2.4.2. La regola della leva	22
2.4.3. Miscibilità	23
2.5. Diffusione atomica	28
2.5.1. La legge di Fick	29
2.6. Il diagramma Ferro – Carbonio	30
2.7. La velocità di raffreddamento	32
2.7.1. Curve di Bain	34
2.7.2. Trasformazioni austenitiche anisoterme	38
2.8. Difetti reticolari	40
2.8.1. I difetti puntiformi	41
2.8.2. I difetti lineari	41

2.8.2.1. La teoria delle dislocazioni.....	41
2.8.2.1.1. Il vettore di Burgers	43
2.8.2.2. La moltiplicazione delle dislocazioni	43
2.8.2.3. I moti delle dislocazioni	45
2.8.3. Difetti superficiali	46
2.8.4. Difetti tridimensionali.....	47
3. Classificazione acciai	49
3.1. Composizione chimica	51
3.1.1. Carbonio.....	53
3.1.2. Silicio	53
3.1.3. Manganese.....	54
3.1.4. Zolfo	55
3.1.5. Fosforo	55
3.1.6. Cromo	56
3.1.7. Alluminio	56
3.1.8. Vanadio	57
3.1.9. Azoto	57
3.1.10. Ossigeno.....	58
3.1.11. Idrogeno.....	58
3.1.12. Altri elementi	59
3.1.12.1. Molibdeno	60
3.1.12.2. Nichel	60
3.1.12.3. Rame	61
3.1.12.4. Titanio	62
3.2. Controlli.....	63
3.2.1. Composizione chimica	65
3.2.2. Contenuto di idrogeno	65
3.2.3. Contenuto di ossigeno.....	66
3.2.4. Controllo microstrutturale	67

3.2.5. Decarburazione	68
3.2.6. Durezza di Brinell.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.2.7. Test di resistenza a trazione	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.2.8. Macrografia	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.2.9. Procedure di riprova.....	68
4. Processo produttivo	69
4.1. Materie prime	70
4.1.1. I minerali	71
4.1.2. Rottami e recuperi.....	72
4.2. Operazioni preliminari.....	73
4.3. Pretrattamento dei minerali.....	74
4.4. Prima fusione	76
4.5. Desolforazione	82
4.6. La conversione del metallo	84
4.7. Raffinazione	88
4.8. Colata	89
4.9. La laminazione.....	90
4.10. Marchiatura.....	92
4.11. Trattamenti termici	95
4.11.1. La tempra dell'acciaio.....	95
4.11.2. Ricottura.....	96
4.11.3. Normalizzazione	97
4.12. Taglio, raffreddamento e raddrizzatura	98
4.13. Controlli non distruttivi	99
4.13.1. Correnti indotte.....	99
4.13.2. Controllo agli ultrasuoni	99
4.14. Criteri geometrici di accettabilità	101
4.14.1. Regolarità superficiale	101
4.14.2. Tolleranze dimensionali.....	102

4.15. Taglio e foratura	104
4.16. Controllo rettilineità	106
4.17. Collaudo	110
4.17.1. Collaudo esterno	110
4.17.2. Collaudo qualitativo	111
4.17.2.1. Prova d'urto	111
4.17.2.2. Prova di trazione	112
4.17.2.3. Macrografia	115
4.17.2.4. Durezza di Brinell.....	115
4.17.2.5. Analisi chimica	118
4.17.2.6. Plane strain fracture toughness.....	118
4.17.2.7. Prova di crescita delle cricche per fatica	121
4.17.2.8. Prove di resistenza a fatica	122
4.17.2.9. Stress residuo nella suola	123
4.18. Centro servizi.....	124
4.19. Saldatura	126
5. Fenomeni di deterioramento e avarie delle rotaie	132
5.1. La fatica	132
5.2. Corrosione e ossidazione.....	137
5.3. L'usura.....	142
5.4. Deterioramento delle testate.....	147
5.5. Deterioramento laterale del fungo.....	149
5.6. Abrasioni	150
5.7. Marezzatura	151
5.8. Cedimenti.....	152
5.9. Festoni.....	152
5.10. Macchie ovali	153
5.11. Scagliatura del piano di rotolamento.....	154
5.12. Interventi esterni.....	155

5.13. Il catalogo dei difetti.....	155
6. Rimedi ai difetti	159
6.1. Introduzione.....	159
6.2. Strategie di molatura.....	162
6.3. Vantaggi economici	164
7. Conclusioni	165
8. Bibliografia	166

ABSTRACT

In un contesto mondiale di radicale cambiamento delle abitudini di mobilità, imposto dalla necessità di un rispetto dell'ambiente per cui c'è una sensibilità in costante crescita e quindi di un'ecosostenibilità sempre più importante ed incentivata, la ferrovia è destinata a diventare una delle principali alternative al trasporto autoprodotta, che crea inquinamento e congestione nelle strade e città di tutto il mondo.

Affinché una modalità di trasporto sia fruibile ed utilizzata dall'utenza è fondamentale che venga percepita come assolutamente sicura, oltre che affidabile, puntuale, economica ecc. Parlando di ferrovia si ha a che fare con un veicolo omonimo, pertanto diventa di primaria importanza investigare sull'interazione mezzo – via, sulla loro reciproca influenza nel tempo e, prima ancora, sui processi che portano alla formazione dei prodotti finiti, che una volta assemblati danno forma al concetto di ferrovia come lo conosciamo. Il primo passo per la garanzia di un elevato livello di sicurezza risiede quindi nel controllo accurato di tutti quegli elementi che andranno a interagire durante il normale esercizio in linea. Col passare degli anni l'espansione tecnologica, la conseguente nascita di mezzi sempre più performanti e l'aumento di traffico hanno permesso e spinto per un controllo sempre più efficace e restrittivo del materiale rotabile fin dalla sua realizzazione in acciaieria, non solo a prodotto finito, ma anche durante tutti i processi di formazione e lavorazione.

Questa tesi si prefigge l'obiettivo di fare luce su quelli che sono i principali inconvenienti che possono derivare da un errato processo di lavorazione e quali sono le misure di controllo adottate per verificare la conformità ai requisiti delle normative riguardanti gli armamenti ferroviari, in modo che la sicurezza della marcia possa sempre essere garantita durante tutta la vita utile prevista per il pezzo in analisi.

L'elaborato verrà suddiviso in una prima parte in cui si tratta la composizione e la struttura degli acciai, la sua formazione e i suoi difetti. Nel seguito si fa luce sulle verifiche di accettabilità imposte dalle normative durante il processo produttivo, sui controlli in esercizio e sui fenomeni di degrado tipici dell'esercizio. Infine si conclude con una breve trattazione del metodo maggiormente utilizzato in sede di manutenzione ordinaria ferroviaria: la molatura.

ABSTRACT

In a worldwide contest of radical change of mobility habits, imposed by the need of a constant growing environmental care, ecosustainability is becoming increasingly important and railway is going to be one of the most appealing alternatives to selfmade transport, which pollutes and congestions cities all over the world.

In order to make a mean of transport attractive and largely used by people, first of all it must be perceived as totally sure, furthermore also reliable, punctual, cheap etc. Railways are olonom vehicles, so it is very important to investigate on the interaction between vehicle and way, on their reciprocal influence during exercise, and beside this, on the processes that lead to final products, which together give form to railways as we know it in everyday life.

The first step to guarantee an high level of safety is to control carefully all the elements which will be in contact during daily exercise. In recent years the new technology permitted the birth of new means more suitable to their functions, which allow and control more effectively and strictly railway material, starting from steel-working production and not only on final products, but also during all processes that lead to it.

This thesis wants to show all the most important inconvenients deriving from a mistaken working process and highlights the controls adopted to verify conformity to railways standards, in order to ensure the safety of every piece during its useful life.

In the first part of this thesis will be treated the composition and the structure of steels, their formation and defects. Then will be discussed the acceptability parameters imposed by the European standards during the production process, the controls during exercise and the degradation due to daily rail work. In the end there is also a small traction on one of the most commonly used methods during maintenance: grinding.

1. Introduzione

L'importanza della garanzia della sicurezza in esercizio è fondamentale, come già rimarcato, ed essa è strettamente collegata agli standard definiti dalle norme di riferimento, sia per quanto concerne il processo di produzione, sia quello di controllo del prodotto finito. Soprattutto nell'ultimo decennio in Italia, con l'avvento delle linee ad Alta Velocità e Alta Capacità, si ha avuto la possibilità di ottenere prestazioni altissime, che devono essere adeguatamente supportate da infrastrutture ben controllate e mantenute.

Anche in ferrovia, come in tanti altri campi di vasta applicazione dell'ingegneria civile, esistono normative di riferimento internazionali che regolamentano e definiscono l'idoneità dei materiali rotabili e dell'infrastruttura.

Nel caso in analisi la normativa di riferimento è la EN 13674, redatta nel 2002 da un comitato tecnico su mandato del CEN (comitato europeo di normazione), basatosi sulle precedenti normative, che verranno citate al momento opportuno nel testo, per redarre questo nuovo documento, che è un riferimento per i tecnici del settore e al quale ci si riferirà nella trattazione della tesi.

L'obiettivo di questo lavoro è investigare sul processo produttivo e sulla serie di controlli effettuati sulle rotaie al fine di verificarne l'idoneità all'uso. Inoltre verranno discussi i principali fenomeni di degrado derivanti dall'esercizio, i pericoli conseguenti e i mezzi di prevenzione e cura.

2. Metallurgia

La metallurgia è l'insieme di trattamenti industriali effettuati sui minerali e le materie prime finalizzati ad ottenere metalli e leghe aventi determinate caratteristiche utili a diverse applicazioni. Nel caso dei binari ferroviari il prodotto di maggiore interesse è sicuramente l'acciaio, che viene appositamente trattato per ottenere delle proprietà adatte a questa applicazione.

2.1. Composizione di base

L'acciaio è una lega i cui principali costituenti sono ferro e carbonio, il cui contenuto deve essere inferiore al 2,11%, perché altrimenti si parla di ghisa. Il ferro costituisce il solvente, ossia l'elemento presente in maggior quantità nel quale si dissolve il soluto, principalmente carbonio. Oltre a questi elementi l'acciaio ne contiene molti altri in differenti concentrazioni in funzione del tipo di oggetto che si vuole creare e delle condizioni di esercizio cui sarà soggetto il pezzo. I principali elementi presenti in generale sono: manganese (Mn), silicio (Si), fosforo (P), zolfo (S), cromo (Cr), alluminio (Al), vanadio (V) e azoto (N).

Tutti questi elementi durante i processi di lavorazione subiscono delle trasformazioni dallo stato liquido a quello solido e vanno a creare una microstruttura che può presentarsi in svariate forme e con proprietà molto diverse a seconda della sua composizione e delle lavorazioni subite.

2.2. Struttura metallica

La struttura di un solido metallico è definita dalla disposizione spaziale di atomi, legati da legame metallico, che tende a essere quella minimizzante l'energia potenziale del sistema, ossia l'insieme di forze di attrazione e repulsione che si scambiano gli atomi in funzione della loro distanza. Nel caso dei metalli si ha un insieme di ioni carichi positivamente in posizione fissa a comporre una struttura elementare ripetuta nello spazio, che viene chiamata cella.

L'accostamento di più unità compone un reticolo tridimensionale, che più è regolare più è compatto, all'interno del quale si hanno elettroni che si muovono in tutte le direzioni a gran velocità e che non appartengono a nessuno ione in particolare.

Il cosiddetto legame metallico quindi altro non è che l'attrazione reciproca elettrostatica tra ioni ed elettroni in una situazione di condivisione di questi ultimi, che di fatto formano come una nube elettronica che fa da legante tenendo insieme i nuclei positivi. Proprio a questo tipo di legame, molto forte, i metalli devono molte delle loro proprietà come ad esempio: conducibilità termica ed elettrica riconducibili alla presenza del "mare" di elettroni, alta densità, compattezza e alto punto di fusione (1538 °C) dovute alla grande forza del legame e infine malleabilità e duttilità date dallo scorrimento dei piani atomici, reso possibile dalla presenza di elettroni liberi di muoversi nello spazio.

2.3. Formazione della microstruttura

La definizione della microstruttura avviene attraverso il processo di solidificazione che si genera durante le lavorazioni in acciaieria e porta il materiale ad assumere una struttura a grani, la cui formazione avviene in due fasi: la prima è denominata nucleazione ed è caratterizzata dalla nascita delle strutture cristalline ancora immerse nel liquido, nella seconda fase caratterizzata da una diminuzione delle temperatura tali strutture crescono e il risultato finale è un insieme di cristalli disposti casualmente, caratteristica che rende isotropo il materiale.

Il risultato quindi è un insieme di grani reciprocamente confinanti i cui estremi prendono il nome di bordi o contorni e il cui numero è dipendente da molti fattori, i principali sono: temperatura iniziale del liquido e sua distribuzione nello spazio, presenza di impurità e di alcuni elementi in lega aventi particolari proprietà, velocità di raffreddamento, che maggiore è e minore è la dimensione dei grani, e pressione, parametro che però solitamente viene mantenuto costante al valore atmosferico. Maggiore è il numero di grani che si viene a formare e minori saranno le dimensioni finali in quanto l'incontro dei grani comporta la fine della loro espansione. In sede di lavorazione solitamente si predilige una struttura fine perché consente di avere caratteristiche meccaniche migliori.

Il passaggio dallo stato liquido a quello solido può essere di due tipi: omogeneo quando si concretizza all'interno del materiale fuso, eterogeneo se si espleta a contatto con un'interfaccia esterna, come ad esempio un contenitore.

La nucleazione omogenea avviene a una temperatura inferiore a quella di fusione, perché è legata a una forza chiamata tensione superficiale (γ_{s-l}). L'energia di superficie associata a tale tensione viene calcolata a partire dall'ipotesi che i nuclei in formazione abbiano forma sferica con raggio r e la sua espressione è:

$$G_{superficiale} = 4\pi * r^2 * \gamma_{s-l}$$

questa energia è contrastata dall'energia di volume, che tende a formare nuclei solidi e viene scritta come:

$$G_{volume} = \frac{4}{3}\pi * r^3 * G_v$$

la nucleazione avviene solo se l'energia di Gibbs, di cui si parlerà nel seguito, risulta essere < 0 , quindi deve risultare:

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi * r^3 * G_v + 4\pi * r^2 * \gamma_{s-l} < 0$$

affinché questo sia possibile il primo addendo deve essere negativo e più nello specifico deve esserlo G_v , che è definito come:

$$G_v = L * \frac{\Delta T_n}{T_f} = L * \frac{T - T_f}{T_f}$$

in questa espressione: T è la temperatura cui si trova il liquido, T_f è la temperatura di fusione e L è il calore latente di fusione, quindi per essere negativo ΔT_n deve essere negativo, il che implica che la temperatura di fusione deve essere maggiore di quella a cui avviene la reazione.

Dalle equazioni scritte risulta quindi evidente che maggiore è la tensione superficiale, maggiore dovrà essere il grado di sottoraffreddamento per permettere la nucleazione, perché in caso contrario i nuclei cristallini che si formano tendono a tornare allo stato liquido, difatti uno degli stratagemmi utilizzati durante il processo produttivo è aggiungere elementi che riducano la tensione superficiale. Per essere stabili in alternativa i nuclei devono avere un raggio, detto raggio critico (r^*), tale da rendere

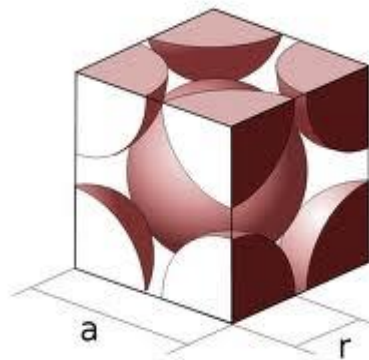
$$\frac{d\Delta G}{dr} < 0$$

i valori del raggio critico diminuiscono al crescere di G_v e al diminuire di γ_{s-l} .

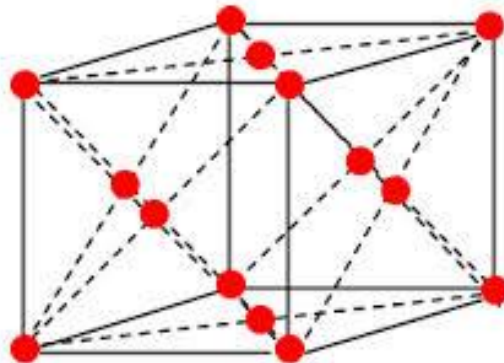
Le strutture che si formano durante la fase di nucleazione cambiano a seconda del composto che si sta formando e nel caso degli acciai possono essere di due tipi:

- nel primo caso la struttura cristallina è chiamata cubica a corpo centrato (ccc), ha numero di coordinazione pari ad 8 ed è composta da un atomo centrale circondato da altri otto disposti ai vertici degli spigoli formanti la struttura cubica. In questo caso quindi il reticolo cristallino è costituito dal ripetersi di questa cella elementare in cui le particelle si trovano in contatto lungo la diagonale del cubo. Per stimare la compattezza di una struttura atomica se ne calcola il fattore di compattazione atomica (FCA), definito come il volume degli atomi presenti nella cella elementare diviso per il

volume totale della cella. Maggiore è tale valore e più compatta è la struttura, che in questo caso fornisce un valore di 0,68.



- il secondo caso invece è completamente differente e prende il nome di struttura cristallina cubica a facce centrate (cfc), in cui non vi è un atomo centrale attorno cui si dispongono gli altri, bensì sei facce uguali del cubo in cui vi sono quattro atomi ai vertici e un atomo centrale come mostrato dalla figura sottostante; il numero di coordinazione di questa struttura è 12 e anche in questo caso gli atomi sono in reciproco contatto, ma lungo la diagonale della singola faccia. Questa struttura risulta più compatta della precedente difatti ha un FCA pari a 0,74.



2.3.1. Le allotropie dell'acciaio

Parlando di acciaio, come già anticipato, c'è da dire che in generale il principale costituente a livello di percentuale in peso è il ferro, presente per almeno l'85% del peso totale; proprio questo elemento è definito polimorfico o allotropico, in quanto forma col carbonio, che prende posto in posizione interstiziale, le due microstrutture cristalline appena viste in funzione della temperatura cui si trova il materiale e che prendono il nome di: ferrite oppure austenite.

Il campo di esistenza stabile della ferrite va da una temperatura di zero assoluto, fino a 912 °C, dopodiché la struttura diviene instabile e si tramuta in austenite, il cui campo di esistenza va da questo valore a 1394 °C, per poi riassumere la forma di ferrite, che per essere differenziata da quella a temperatura minore viene chiamata δ ferrite e il cui campo di esistenza si protrae fino a 1538 °C, temperatura di fusione.

2.3.1.1. Austenite

L'austenite è composta da una soluzione di ferro γ con cementite (Fe_3C) e altri elementi metallici e non metallici, come il carbonio. Ha una struttura cubica a facce centrate che la rende molto compatta e la dimensione dei suoi grani è uno dei principali aspetti che influenzano la struttura e le proprietà meccaniche del materiale, pertanto assumono un'importanza rilevante la temperatura e il tempo di mantenimento oltre le temperature critiche. La sua struttura rimane stabile fino a circa 721 °C, tuttavia attraverso l'aggiunta di elementi che vengono chiamati austenizzanti, come il nichel e il manganese, la si può trovare stabile anche a temperatura ambiente, condizione tipica degli acciai inossidabili e dell'acciaio Hadfield contenente il 13% di Mn.

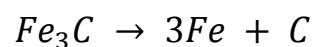
Lo studio delle sue proprietà è molto importante perché essa ha un'elevata solubilità del carbonio rispetto alla ferrite e questo permette di ottenere strutture con alti gradi di inclusione di carbonio, che rendono la struttura più dura e resistente, ma a comportamento fragile. Dalla modalità del suo raffreddamento possono formarsi diverse fasi: perlite, ferrite, martensite o bainite.

2.3.1.2. Ferrite

La ferrite è contraddistinta da una struttura cubica a corpo centrato formata da ferro α con carbonio, o altri metalli, in posizione interstiziale e per acciai con contenuto di C $\leq 0,025\%$ ne è l'unico costituente. La sua formazione è data dal raffreddamento di austenite e avviene per nucleazione e accrescimento a partire dai bordi dei grani, il suo aspetto finale si presenta generalmente più fine di quello austenitico. La ferrite ha caratteristiche meccaniche molto diverse da quelle dell'austenite, difatti si presenta malleabile, poco dura e poco resistente.

2.3.1.3. Cementite

La cementite è un composto metastabile interstiziale che si forma quando il carbonio eccede la sua solubilità nell'austenite o nella ferrite, ha composizione chimica Fe_3C e un contenuto stechiometrico del 6,67% di carbonio. Il termine metastabile significa che la condizione di equilibrio può mutare se al sistema viene fornito un certo quantitativo di energia, che in questo specifico caso porterebbe la cementite a scomporsi secondo la seguente reazione:

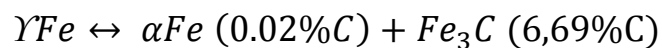


tuttavia per effettuare tale trasformazione, da cui risultano ferro e grafite, è richiesto un tempo nell'ordine di milioni di anni per le ordinarie condizioni di esercizio.

La formazione della cementite è strettamente legata a un'omogenea diffusione degli atomi di carbonio dalla precedente struttura austenitica, cui si accompagna una riorganizzazione strutturale che passa dall'essere cubica a facce centrate a cubica a corpo centrato. Analizzando più nel dettaglio questo carburo di ferro si può dire che esso può essere classificato diversamente in funzione del quantitativo in peso di carbonio che lo compone e che ne determina procedimenti di formazione diversi. Si possono quindi distinguere: la cementite primaria per contenuti $4,3\% \leq C \leq 6,69\%$ che si forma direttamente nella transizione liquido-solido, secondaria con percentuali comprese tra lo 0,8% e il 4,3% che si forma a partire dalla saturazione dell'austenite, infine la terziaria con tenori $\leq 0,8\%$ e che si forma a partire dalla ferrite. A livello di proprietà meccaniche la cementite migliora la durezza e la resistenza della lega, tuttavia favorisce un comportamento fragile.

2.3.1.4. Perlite

La perlite è una fase che si genera dalla nucleazione di nuove colonie ferritiche al cui accrescimento consegue l'espulsione di atomi interstiziali di carbonio dai nuclei ferritici, cosa che crea un'atmosfera particolarmente ricca di carbonio negli intorno dei nuovi grani, presupposto ottimale per la nucleazione di cementite. La reazione chimica quindi è:



questa reazione eutettoide si espleta a una temperatura minore o uguale a 727°C e dà una struttura lamellare in cui si alternano cementite, di aspetto scuro, e ferrite; la velocità di raffreddamento influenza l'interspazio lamellare e tanto maggiore sarà la prima e tanto minore sarà il secondo. Dato che i bordi dei grani austenitici generanti la perlite non hanno un'orientazione spaziale particolare, anche le lamelle non la hanno, pertanto il materiale risulta perfettamente isotropo. La tipica struttura lamellare tuttavia può anche essere globulare se si effettua il cosiddetto trattamento di globulizzazione in cui l'aggregato assume forma sferoidale.

2.3.1.5. Martensite

Esiste poi un altro composto, denominato martensite, diverso dai precedenti in quanto la sua formazione è irreversibile e non avviene attraverso il canonico processo di nucleazione e accrescimento visto fin qui, bensì attraverso il susseguirsi dei seguenti passi: a partire da una struttura austenitica stabile si ha un posizionamento degli atomi di carbonio negli interspazi atomici liberi, abbassando repentinamente la temperatura gli atomi di carbonio non hanno tempo di diffondersi e rimangono intrappolati nel nuovo reticolo andando a costituire una struttura tetragonale allungata in senso verticale. Si ha quindi quella che viene definita una trasformazione displasiva, la cui peculiarità è il non necessitare di una diffusione atomica nello spazio, difatti nella trasformazione descritta si ha solo un riarrangiamento degli atomi a formare una nuova struttura cristallina. Inoltre non richiedendo diffusione è indipendente dal tempo, ma dipendente dalla temperatura finale, il cui valore influenza la percentuale di materia che passa da uno stato all'altro, minore è quest'ultima e maggiore è la frazione trasformata. Il risultato finale è una struttura particolarmente dura e resistente, il cui reticolo assume una forma

tetragonale a causa delle distorsioni indotte dalle inclusioni di atomi di carbonio rimaste in posizione interstiziale.

2.3.1.6. Bainite

Infine va citata anche la bainite, struttura che può differire molto in funzione della temperatura e della velocità di raffreddamento e che si genera nell'intervallo di temperature in cui si formano perlite e martensite; fondamentalmente ha la stessa composizione della perlite, ovvero ferrite e cementite, tuttavia la forma dell'aggregato è aghiforme e i carburi sono molto fini e dispersi casualmente, pertanto non riescono a formare una struttura continua come nella perlite. Si possono distinguere due tipi di strutture bainitiche in funzione della temperatura cui avvengono le trasformazioni:

- bainite superiore se la temperatura è di poco inferiore ad A_1 , è contraddistinta da ferrite e particelle fini di cementite isolate
- bainite inferiore con aspetto aciculare tanto più pronunciato quanto minore è la temperatura

2.4. Diagrammi di stato

Per poter descrivere al meglio le fasi presenti in un sistema in una condizione di equilibrio si possono utilizzare i diagrammi di stato, che permettono di rappresentare graficamente le condizioni di equilibrio di un sistema composto da uno o più metalli.

Per individuare la loro quantità e composizione chimica a partire dalla conoscenza di grandezze che descrivono lo stato di fatto del sistema, come ad esempio: temperatura, pressione e composizione chimica globale, si utilizza la funzione di Gibbs. L'ipotesi di partenza è che il sistema si trovi in equilibrio termodinamico, quindi una situazione in cui: temperatura, pressione, stato di aggregazione e concentrazione delle specie chimiche non si trasformano nel tempo. Tale configurazione permette al sistema di soddisfare il principio di minima energia libera. L'energia libera o funzione di Gibbs è definita dalla seguente espressione:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

in cui: G rappresenta l'energia libera di Gibbs, H è l'entalpia della trasformazione, T la temperatura espressa in Kelvin e S l'entropia. Questa equazione è la base della descrizione delle trasformazioni in equilibrio termodinamico. I casi che si possono verificare sono tre:

- $\Delta G < 0$: indica una reazione esoergonica, ossia che avviene spontaneamente
- $\Delta G > 0$: indica una reazione endoergonica, ovvero che non ha la tendenza a venire spontaneamente
- $\Delta G = 0$: indica una condizione di equilibrio termodinamico

L'energia libera di Gibbs quindi permette di riconoscere la spontaneità di una reazione a partire dalla conoscenza delle variabili descrittive del sistema. Per pressione e temperatura costanti, una reazione può avvenire solo se accompagnata da una diminuzione di energia libera e maggiore è la variazione e maggiore è l'affinità chimica tra le specie reagenti. Per questo motivo il calcolo di questa grandezza è fondamentale nello studio di equilibri chimici e transizioni di fase, difatti basta conoscerne il valore per sapere se esse saranno permesse oppure no. Inoltre si possono dedurre le condizioni per cui il sistema

si trova in equilibrio, aspetto fondamentale per controllare e seguire al meglio i processi metallurgici.

Al fine di chiarire meglio quanto enunciato risulta indispensabile chiarire cosa si intende per fase, ovvero una parte di materia chimicamente e fisicamente omogenea avente un'unica struttura cristallografica e unico stato di aggregazione, che reagisce in modo identico se sottoposto a delle sollecitazioni chimiche e fisiche. Essa può essere costituita da uno, più elementi oppure da un composto chimico, i quali possono esistere in diverse fasi, come visto nel caso delle forme allotropiche del ferro.

2.4.1. Regola delle fasi

Il numero di gradi di libertà di un sistema è il numero di fattori indipendenti che possono essere variati arbitrariamente per raggiungere una nuova situazione di equilibrio e per stimarlo si utilizza la regola delle fasi di Gibbs, la cui espressione è:

$$V = C + f - \phi$$

In cui:

- V rappresenta i gradi di varianza del sistema, ossia il numero di variabili che è necessario definire per un sistema in modo che le condizioni del sistema siano definite
- C è il numero di componenti chimici indipendenti presenti nel sistema
- f è il numero di variabili fisiche necessarie a descrivere il sistema, solitamente sono pressione e temperatura, tuttavia $f = 1$ perché la pressione è mantenuta costante.
- ϕ è il numero di fasi presenti

Il numero V risultante quindi è il numero di grandezze che se variate identifica univocamente il valore delle altre variabili.

Attraverso i diagrammi di stato dunque è possibile: conoscere la composizione di un sistema al variare delle grandezze che lo descrivono, calcolare le quantità di fasi presenti in una condizione di equilibrio, conoscere le temperature di fusione e del cambio delle diverse fasi, infine si può determinare la solubilità massima di un componente in un altro.

I diagrammi di stato hanno un numero di assi necessari a descrivere il sistema pari al numero di componenti indipendenti che lo compongono. Nel caso degli acciai abbiamo visto come siano molti gli elementi facenti parte delle leghe, tuttavia all'aumentare del loro numero la trattazione con diagrammi di stato si complica sensibilmente. Per questo motivo si è soliti riferirsi a diagrammi di stato binari, o ternari riferiti ai componenti maggiormente presenti, per poi studiare separatamente l'influenza reciproca dell'aggiunta dei singoli elementi.

Si reputa interessante portare all'attenzione anche un esempio su come si evince la composizione chimica delle fasi del sistema a partire dalla lettura del grafico.

Come prima cosa si fissa la composizione chimica, per questa è fondamentale specificare che sull'asse si riporta la quantità presente di un unico elemento, mentre la quantità dell'altro componente del sistema viene dedotta per differenza. Fissata questa variabile si percorre una verticale rappresentante diversi valori di temperatura e per ogni valore di questa grandezza si può individuare sia la composizione chimica media del sistema, sia la composizione delle sue diverse fasi. Per poter effettuare questa operazione ci si serve della regola della leva.

2.4.2. La regola della leva

La cosiddetta "regola della leva" permette di calcolare le quantità delle diverse fasi presenti in un sistema binario per valori fissati di temperatura e composizione chimica. Tali fasi vengono rappresentate da due o più punti, che si trovano sempre sull'orizzontale isoterma relativa alla T considerata.

Muovendosi sulla verticale si individuano una serie di punti rappresentanti il sistema nel suo complesso, da cui ci si muove a destra e sinistra fino a incontrare le linee di monovarianza, il cui numero è pari al numero di fasi presenti nel sistema. La quantità delle fasi presenti è proporzionale alla lunghezza del segmento opposto al punto individuato dalla verticale che si sta percorrendo. Analiticamente si esprime come segue:

$$q_1 + q_2 = 100$$

$$q_1 * a = q_2 * b$$

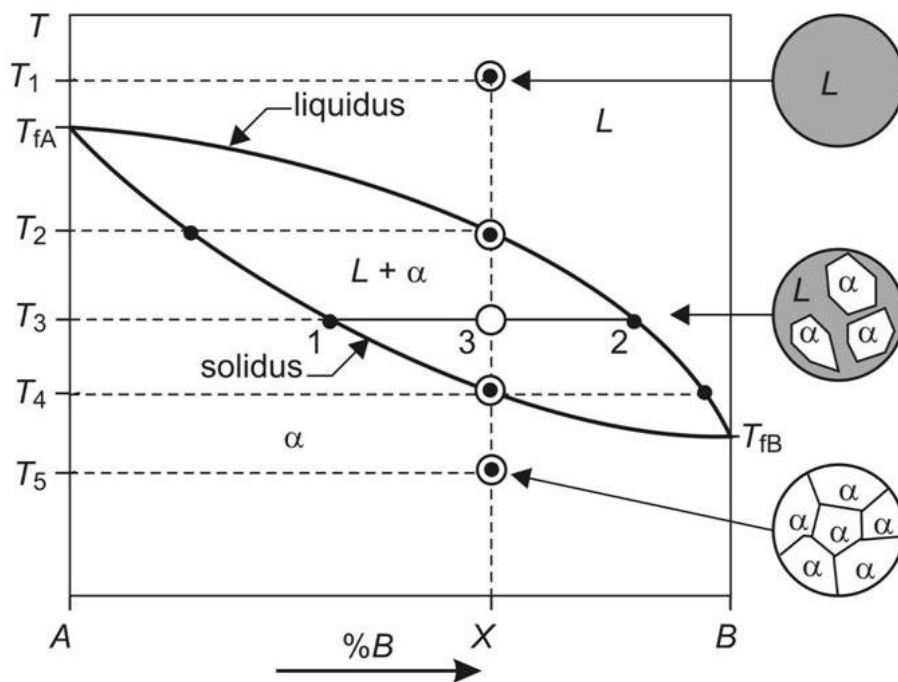
$$q_1 = \frac{b}{(a+b)} * 100 \qquad q_2 = \frac{a}{(a+b)} * 100$$

dove a e b sono i segmenti sopracitati.

2.4.3. Miscibilità

Parlando di queste trasformazioni è di fondamentale importanza rimarcare come due metalli componenti una lega siano completamente miscibili allo stato liquido, mentre può essere che non lo siano allo stato solido. I casi che possono presentarsi quindi sono essenzialmente tre: completa miscibilità, parziale miscibilità oppure completa immiscibilità allo stato solido.

Il caso di completa miscibilità è il più semplice e il suo studio è necessario per comprendere la trattazione successiva. Per trattarlo ci si riferisce alla seguente immagine:



Percorrendo la verticale I dall'alto verso il basso si possono comprendere i fenomeni che accadono durante i raffreddamento:

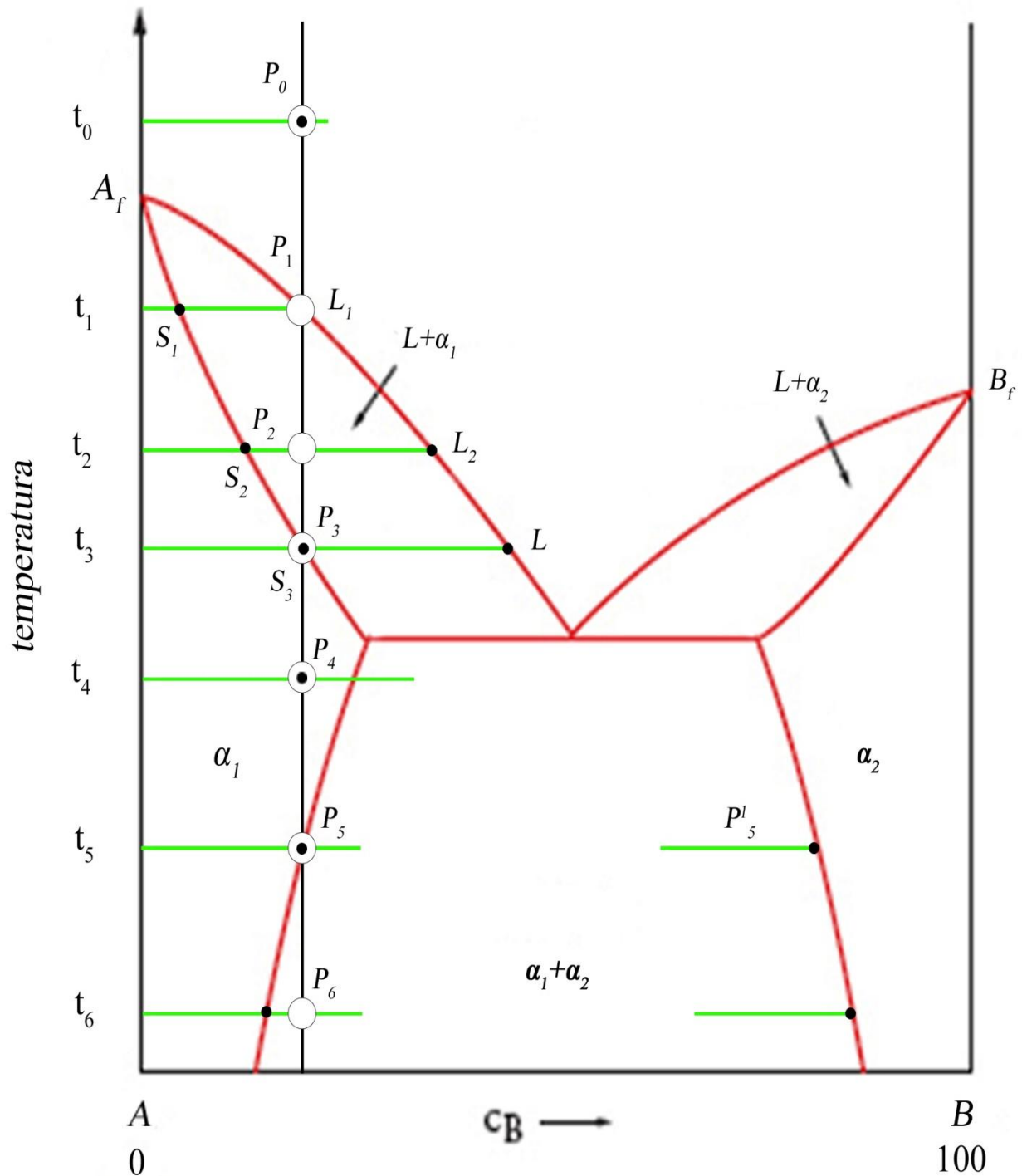
- alla temperatura T_1 la lega è completamente fusa
- arrivando al punto T_2 si incontra la prima linea di monovarianza e inizia il fenomeno della solidificazione, quindi il sistema è composto ancora quasi interamente da liquido
- abbassandosi al punto T_3 si può notare che la fase liquida scompare progressivamente a favore di quella solida e la percentuale delle due fasi è individuata dall'intersezione data dall'orizzontale rappresentante la temperatura e le linee di monovarianza, il cerchietto vuoto rappresenta la composizione media del sistema, da cui si tracciano i segmenti utili a

calcolare le fasi con la regola della leva. Si noti che sta variando sia la composizione del liquido, più ricco di metallo B, sia quella del solido, che sta cambiando composizione

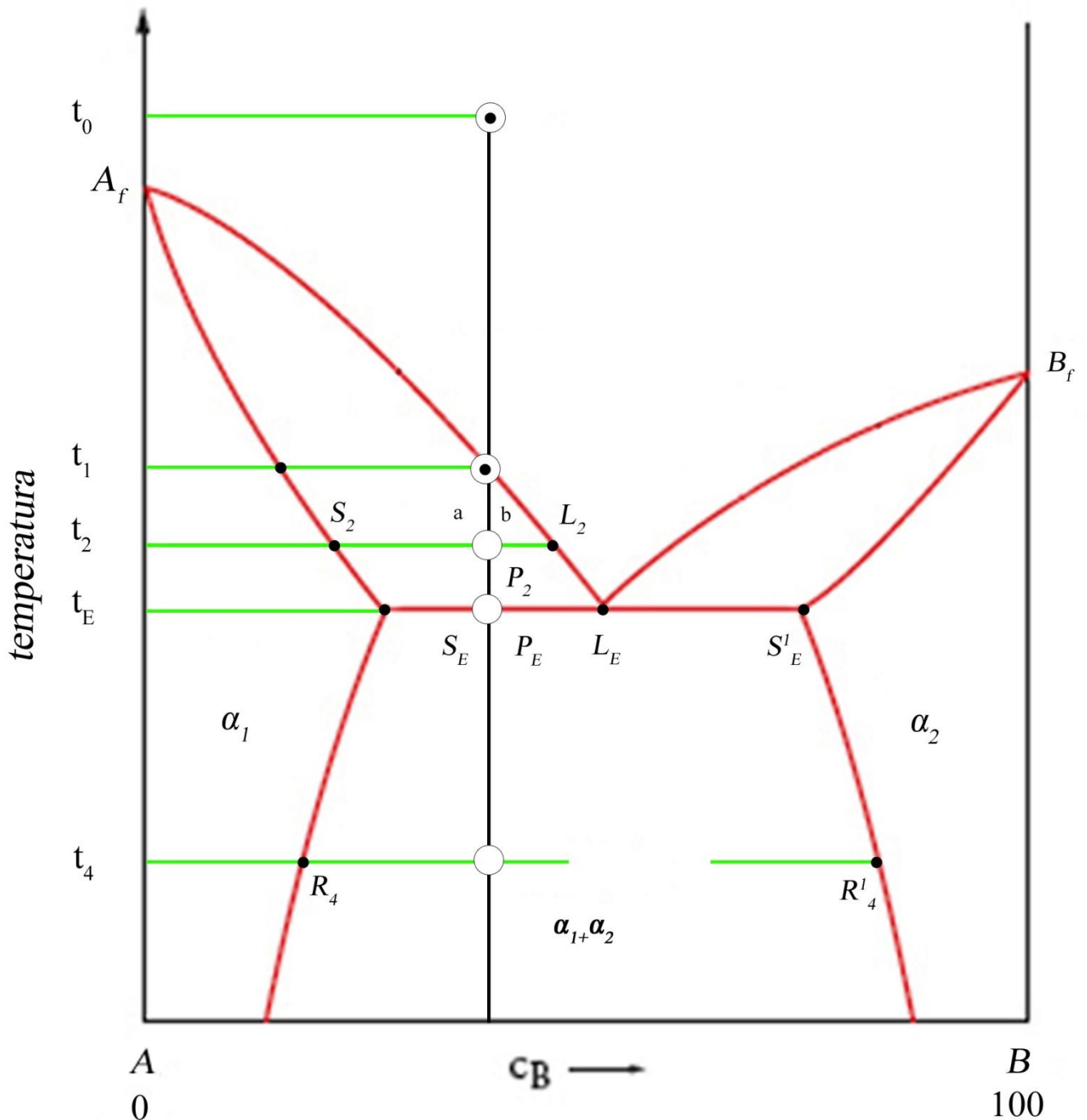
- giunti poi alla temperatura T_4 il materiale è quasi completamente solido, tanto da poter trascurare la percentuale di liquido residua, come fatto precedentemente col solido a inizio solidificazione
- sotto T_4 il sistema è monofasico solido

Ben più significativo ai fini metallurgici pratici è invece il caso della parziale miscibilità, per il quale possono presentarsi due diversi sottocasi: trasformazione peritettica se la temperatura di fusione del metallo B è inferiore all'orizzontale, oppure eutettica se è superiore.

I grafici che seguono sono riferiti a una trasformazione eutettica, di maggior interesse ai fini della trattazione. Si può notare che rispetto al precedente presentano una regione centrale vuota, la cui grandezza è variabile in funzione appunto della miscibilità.



Fissato un valore di composizione chimica e percorrendo la verticale I, come già fatto in precedenza, le considerazioni sono analoghe a quelle fatte in precedenza fino al raggiungimento della temperatura T_5 , perché in questo punto si incontra la linea limitante il campo di miscibilità e questo significa che il metallo B ha raggiunto la sua massima concentrazione nei cristalli α , pertanto viene espulso sotto forma di cristalli β di composizione $C_{P'_5}$, creando quindi una nuova fase. Abbassando ulteriormente la temperatura si assiste a una progressiva variazione delle composizioni chimiche delle fasi α e β .



Per una migliore comprensione è utile considerare una verticale situata più a destra di quella appena considerata, come quella indicata con H nella figura qui sopra. Dalla temperatura T_0 alla T_2 , le considerazioni sono ancora una volta analoghe alle precedenti. Giunti alla T_E , che rappresenta l'orizzontale eutettica, il meccanismo di solidificazione cambia. In questo punto infatti il liquido non si trasforma solamente in grani α , ma inizia a formarsi un cristallo eterogeneo denominato eutettico, che è un miscuglio delle fasi α e β ed ha un aspetto lamellare. Sotto la temperatura T_E scompare il punto L_E rappresentante la fase

liquida, difatti il sistema si trova completamente allo stato solido e subisce una trasformazione analoga a quella vista in precedenza, tuttavia assumono particolare importanza i fenomeni diffusivi allo stato solido. Questi sono realizzati abbastanza facilmente nei grani eutettici in decomposizione, in quanto gli atomi devono percorrere distanze minime, tuttavia il processo è difficile che si compia completamente.

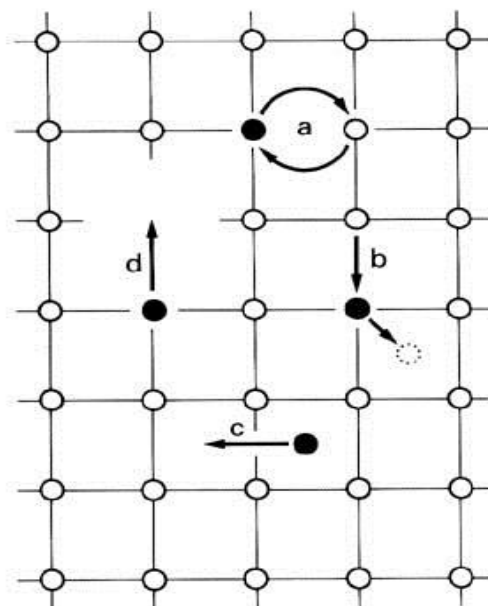
Il caso di completa immiscibilità non viene trattato in quanto di scarso interesse pratico per la trattazione in analisi, in questo caso infatti i metalli, sebbene miscelati, rimangono allo stato puro.

2.5. Diffusione atomica

Come accennato in precedenza, le strutture di base viste finora non sono mai pure a causa di inclusioni di elementi estranei, i cui meccanismi di disposizione spaziale verranno enunciati nel seguito. Questi elementi possono diffondersi nel reticolo in maniera differente andando a incidere in modo determinante sulle proprietà e sulla conformazione del reticolo. Si parla di diffusione quando ci si riferisce al fenomeno di trasporto di atomi all'interno di materia verso una condizione di equilibrio termodinamico, ossia una soluzione solida omogenea, nella quale si ha un movimento di atomi dalle zone a maggiore concentrazione di un elemento a quelle in cui questo è presente in minor misura.

Esistono due tipi di diffusione principalmente:

- per vacanze: in cui gli atomi vacanti si spostano per le posizioni vuote del reticolo, che prendono appunto il nome di vacanze, ed è un fenomeno che diviene tanto più importante quanto maggiore è la temperatura, perché all'aumentare dell'energia termica disponibile aumenta il numero di vacanze
- per spazi interstiziali: dove gli atomi si spostano nel reticolo occupando gli spazi interatomici, questo processo si verifica più facilmente a causa del numero di siti interstiziali disponibili molto maggiore rispetto al numero di vacanze, richiede un quantitativo di energia basso ed è tipico di quegli elementi che hanno raggio atomico piccolo, come: carbonio, ossigeno, idrogeno e azoto;



2.5.1. La legge di Fick

Ai fini pratici è interessante approfondire il meccanismo di diffusione per vacanze, che è descritto dalla legge di Fick, nella quale vengono messi in relazione i meccanismi di diffusione con il gradiente di concentrazione di un elemento e il suo coefficiente di diffusione.

La formula è:

$$\varphi_i = -D * \frac{dn_i}{dx}$$

in cui ϕ rappresenta il flusso di atomi, D il coefficiente di diffusione (m^2/s) e dn_i/dx il gradiente di concentrazione atomica dell'elemento considerato i , col “-“ davanti a significare che il movimento avviene dalle zone a maggiore verso quelle a minore concentrazione.

Il fatto che gli atomi tendano a muoversi uniformandosi nello spazio implica che debbano avere il tempo per espletare tale movimento, pertanto durante le lavorazioni è molto importante conoscere il tempo per cui un materiale deve essere mantenuto a una certa T per ottenere il grado di diffusione voluto.

Per quanto concerne il coefficiente di diffusione D c'è da dire che esso è funzione della temperatura e offre un'indicazione sulla velocità con cui si muovono gli atomi. La relazione che descrive questo parametro è:

$$D = D_0 * e^{-Q_d/RT}$$

In cui D_0 è indipendente dalla temperatura; R è la costante universale dei gas pari a $8,31 J/(mole * K)$; Q_d rappresenta l'energia di attivazione della diffusione, si esprime in $J/mole$ o $cal/mole$ e può essere pensata come un'energia che è necessario dare agli atomi affinché questi siano in grado di muoversi nel reticolo, maggiore è Q_d e minore sarà D .

Si noti che in generale i valori di diffusività interstiziale sono assai maggiori di quelli per vacanze e che la temperatura influisce sull'energia a disposizione dell'atomo necessaria per rompere i legami con gli atomi vicini e deformare il reticolo in modo da potersi spostare, facendola aumentare in modo esponenziale al suo innalzarsi.

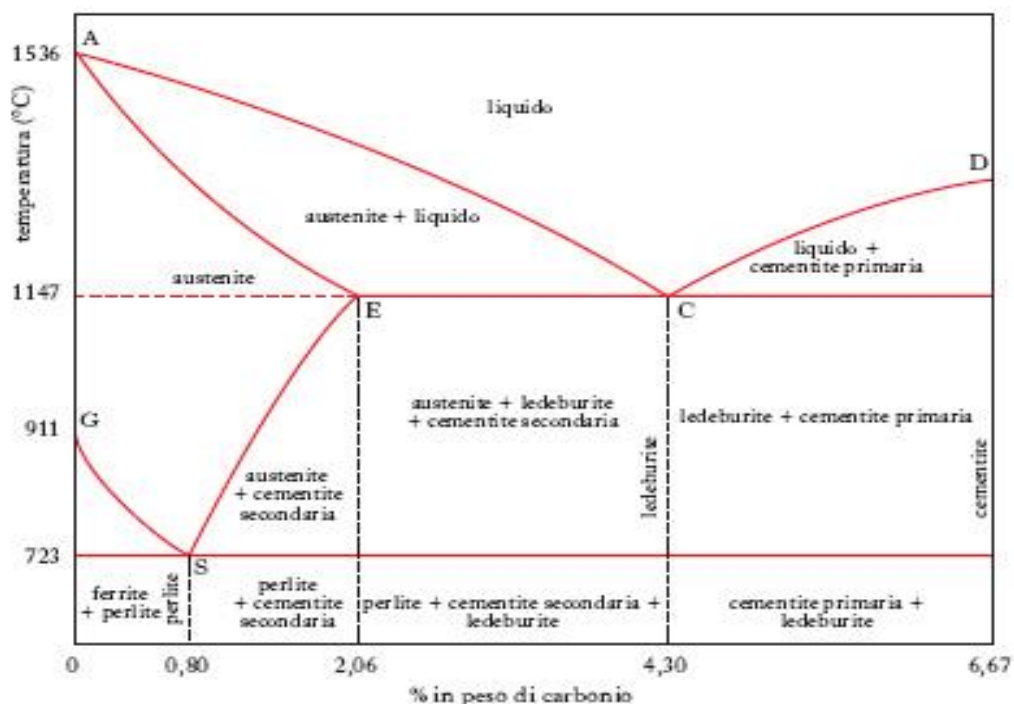
Oltre a questo anche la grandezza media del grano che compone il metallo influenza la diffusione, infatti la migrazione attraverso i giunti intergranulari risulta più facile in generale rispetto al meccanismo attraverso il reticolo, in

quanto l'energia da fornire per favorire la migrazione è minore nel primo caso; può anche succedere che un meccanismo prevalga sull'altro al variare della temperatura, tuttavia sono contributi che in generale risultano trascurabili rispetto agli altri.

2.6. Il diagramma Ferro – Carbonio

Il diagramma di stato di riferimento per la lavorazione degli acciai è quello Ferro – Carbonio, più propriamente detto Ferro – Cementite (Fe_3C), che definisce le regioni di temperatura e percentuali di C in cui esistono le diverse forme allotropiche assunte dall'acciaio, che vengono a crearsi a partire dall'ipotesi che il materiale venga mantenuto per un tempo sufficiente a un determinato valore di temperatura in modo da favorire la ripartizione degli elementi tra le diverse fasi, in accordo col principio di minima energia libera. Anche se in realtà questa situazione non accade praticamente mai questo diagramma rimane un elemento utile per comprendere cosa aspettarsi al variare delle diverse grandezze coinvolte, la pressione si suppone venga mantenuta costante e pari a 1 atm.

Il diagramma, mostrato nella seguente figura, riporta in ascissa la percentuale di carbonio presente in lega e in ordinate la temperatura e permette di individuare la composizione delle singole fasi costituenti il sistema.



Dal diagramma si nota come esistano particolari valori di temperatura a cui si manifestano delle condizioni di equilibrio preludio a variazioni di fase. Si definiscono quindi le seguenti temperature:

- Linea GS: separa il campo in cui esiste solo l'austenite da quello in cui coesistono austenite e ferrite, viene chiamata anche A_3
- l'orizzontale eutettoide, situata a 727°C , ossia la temperatura a cui si ha il passaggio da austenite a perlite e viene denominata anche A_1
- $A_{cm} = 1148^\circ\text{C}$ è la linea che separa il campo di esistenza dell'austenite da quello in cui quest'ultima coesiste con la cementite

Si deve aggiungere che le temperature A_3 e A_4 sono influenzate dalla presenza degli elementi di lega, oltre che dalla quantità di carbonio presente. Si vengono quindi a creare due situazioni potenziali in funzione della concentrazione dell'elemento aggiunto: le temperature A_3 e A_4 si avvicinano fino a coincidere per un certo valore di concentrazione dell'elemento, andando progressivamente a delimitare il campo di esistenza della fase γ . Oppure all'aumentare della concentrazione di un dato elemento le stesse temperature si allontanano sempre più andando a espandere il campo di esistenza dell'austenite.

Come già accennato i punti critici individuati finora corrispondono a condizioni di equilibrio, tuttavia durante i trattamenti industriali è difficile che una struttura venga a trovarsi in condizione di equilibrio dinamico, pertanto assume un'importanza fondamentale lo studio dell'influenza della velocità di riscaldamento e raffreddamento delle trasformazioni.

2.7. La velocità di raffreddamento

Per ogni tipo di acciaio al carbonio è possibile ottenere una struttura completamente austenitica mantenendolo a una certa temperatura per un certo tempo. Durante il successivo raffreddamento si espleterà una trasformazione che può portare a:

- ferrite e perlite se l'acciaio è ipoeutetoidico, ossia ha un contenuto di carbonio $\leq 0,77\%$
- perlite negli acciai eutetoidici con $C = 0,77\%$
- cementite secondaria e perlite se si ha che $0,77 \leq C \leq 2,11\%$, ossia un acciaio ipereutetoidico

Le strutture appena menzionate possono essere ottenute attraverso l'applicazione di basse velocità di raffreddamento, tuttavia variando opportunamente quest'ultima, in funzione anche della composizione chimica dell'acciaio trattato, è possibile spostare i punti di trasformazione in modo da ottenere strutture diverse, come: perlite fine, martensite e bainite, che si trovano in una condizione che generalmente viene definita di "falso" equilibrio.

Per comprendere al meglio l'influenza della velocità di raffreddamento sulla formazione delle strutture è utile far riferimento al seguente esempio.

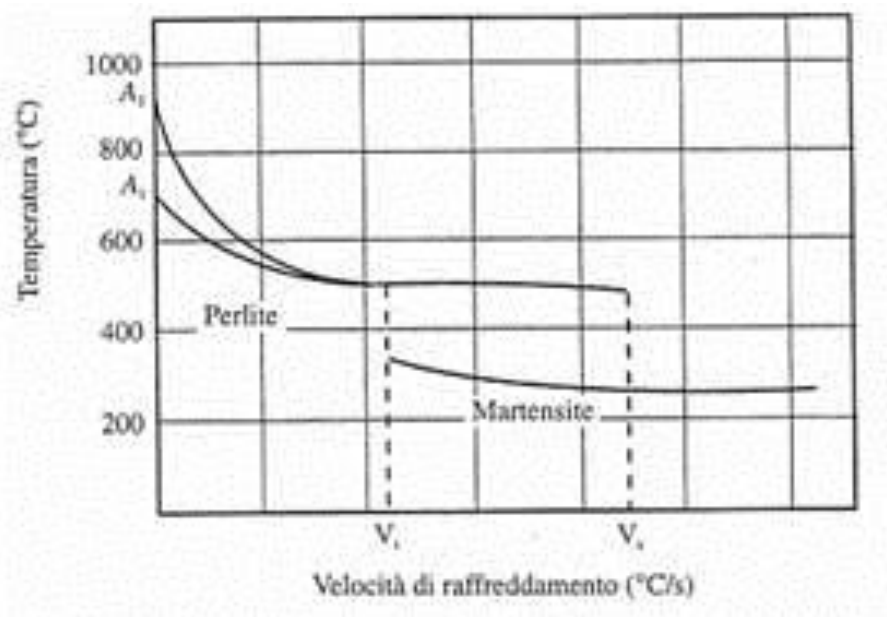
Si immagini di trattare un acciaio ipoeutetoidico a struttura completamente austenitica e di raffreddarne diversi provini con velocità crescenti, che in generale viene espressa in °C/s. Così facendo si ha che le temperature A_{r3} e A_{r1} si abbassano progressivamente a causa dei fenomeni di isteresi¹, tuttavia A_{r3} si abbassa più rapidamente di A_{r1} , quindi oltre un certo valore le linee che le rappresentano coincidono. In questo range di velocità l'austenite si trasforma in perlite a grana sempre più fine, finché nel punto in cui convergono le linee compaiono le strutture bainitiche.

Aumentando ulteriormente la velocità di raffreddamento in corrispondenza di un determinato valore, che prende il nome di velocità critica inferiore (V_i), la linea del grafico si sdoppia e si ha che parte della trasformazione in corso avviene a una temperatura, dalla quale risulta una struttura bainitica, mentre l'altra parte di trasformazione avviene a una temperatura nettamente inferiore alla precedente e dà come prodotto finale martensite.

¹ l'isteresi è la caratteristica di un sistema a reagire all'applicazione di una sollecitazione anche in funzione del suo stato precedente

Aumentando ancora la velocità di raffreddamento aumenta la percentuale di materiale che da austenite diviene direttamente martensite e contemporaneamente diminuisce la percentuale di bainite. Questa tendenza continua ad aumentare fino a raggiungere un valore di velocità che viene definito velocità critica superiore (V_s). Tale valore sancisce il limite oltre il quale si ha la formazione solamente di martensite.

Quanto spiegato finora può essere compreso meglio osservando il seguente grafico



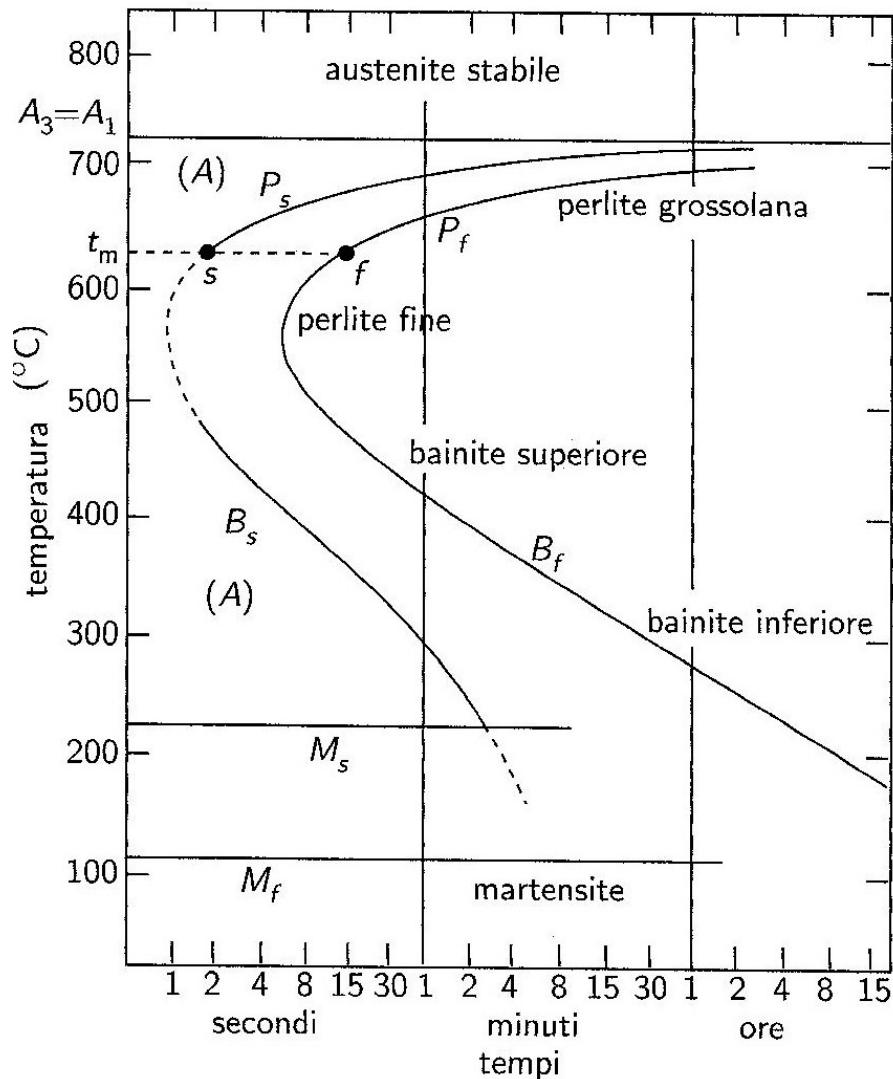
Anche i valori delle velocità critiche sono funzione della composizione chimica dell'acciaio che si sta trattando, in particolare si segnala le velocità critiche sono inversamente proporzionali al contenuto di carbonio, oltre che ad una serie di elementi che si trovano solitamente nella lega, come ad esempio: nichel, cromo e manganese.

Infine si sottolinea come sia molto difficile mantenere una struttura completamente austenitica a temperatura ambiente, se non grazie alla presenza di un elevato contenuto di carbonio o di elementi austenizzanti, ovvero che aumentano il campo di esistenza dell'austenite.

2.7.1. Curve di Bain

Le curve di Bain o curve T–T–T, temperatura – tempo – trasformazione, sono uno strumento molto utile a descrivere il fenomeno del raffreddamento di una lega ferro – carbonio in funzione della cinetica del fenomeno. Il tracciamento di tali curve avviene attraverso lo studio della trasformazione da austenite a perlite su provini di acciaio eutettoide, ossia contenente lo 0,77% di carbonio e per il quale le temperature dei punti critici coincidono ($A_1 = A_3$). Tale trasformazione viene realizzata con velocità di sottoraffreddamento crescenti, portando quindi i provini, a struttura integralmente austenitica, da una temperatura superiore ai 723 °C a temperature costanti e sempre minori. A queste diverse temperature, indicate solitamente con T_m , si osservano i provini, che con l'avanzare del tempo iniziano a trasformarsi da austenite alle altre forme allotropiche tipiche degli acciai.

Per ogni valore di temperatura cui viene condotto l'esperimento si arriva quindi ad avere due valori temporali: il primo indicante il momento in cui inizia la trasformazione dell'austenite e il secondo in cui tale trasformazione finisce. Questo dato permette appunto di tracciare le curve. I risultati vengono riportati mettendo in ascisse il tempo in scala logaritmica e in ordinate la temperatura, i tempi in generale risultano contenuti perché le dimensioni dei provini sono molto piccole, inoltre vengono raffreddati immergendoli in acqua.



Dall'immagine si può notare quindi che sopra la temperatura dell'eutettoide si ha solo austenite stabile, mentre sotto di essa vengono a crearsi tra diversi campi di esistenza:

- il primo campo, a sinistra, è quello in cui la struttura è ancora completamente austenitica, tuttavia essa è instabile e in tempi brevi inizierà la sua trasformazione
- un campo centrale, racchiuso tra le due curve, in cui la struttura austenitica coesiste con la struttura nella quale si sta trasformando
- il terzo campo, a destra, in cui l'austenite ha lasciato completamente spazio a un'altra struttura

poco sotto la temperatura A_1 le due curve che separano i campi tendono asintoticamente ad A_1 , questo significa che per temperature di poco inferiori a quest'ultima la trasformazione da austenite a perlite è molto lenta perché la velocità di nucleazione è molto bassa, mentre la diffusione degli atomi di

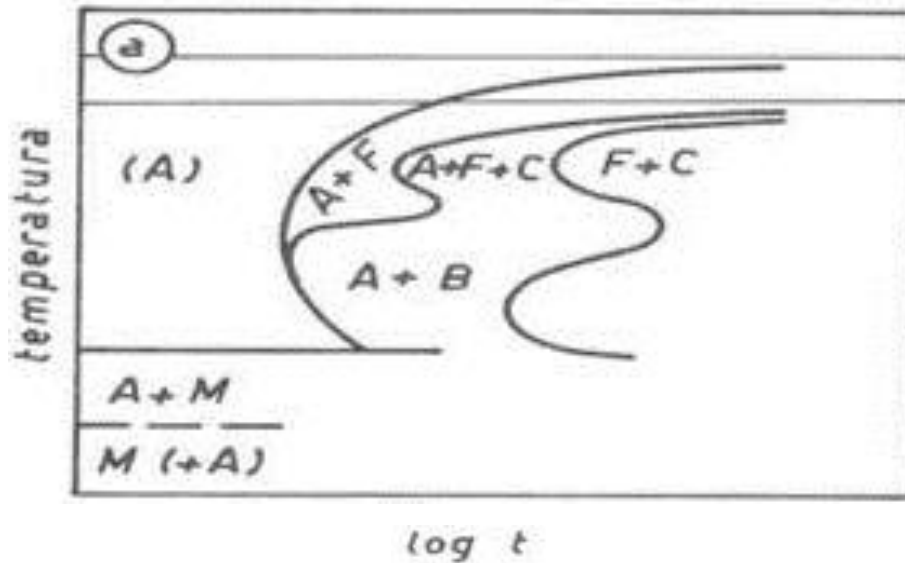
carbonio è alta. Abbassando le t_m la velocità di nucleazione aumenta, mentre la diffusività diminuisce, quindi la perlite assume un aspetto a lamelle sempre più fini, finché tali lamelle non scompaiono. A questo punto non si parla più di perlite, bensì di bainite superiore e abbassando ulteriormente la temperatura si entra nel campo della bainite inferiore.

A basse temperature si può notare come le curve intersechino due linee orizzontali, la prima posizionata poco sopra i 200 °C e chiamata M_s , corrisponde alla temperatura sotto la quale si ha la conversione di parte dell'austenite in martensite. La percentuale di austenite che si trasforma non dipende dal tempo per cui viene mantenuta la temperatura, bensì dal valore di quest'ultima, mentre la parte restante di austenite tenderà a iniziare la sua trasformazione in bainite dopo un tempo dato dall'incontro dell'orizzontale con la parte di curva tratteggiata e finirà la sua trasformazione in tempi molto più lunghi. Abbassando la temperatura verso la linea chiamata M_f aumenta la percentuale di austenite che diviene martensite, fino a raggiungere valori per i quali il materiale si trasforma completamente in quest'ultima.

Come già detto in precedenza il grafico di cui si è discusso finora è relativo ad acciai di composizione eutettoide, variando la percentuale di carbonio presente il grafico si presenta ben più complicato. In entrambi i casi le temperature A_1 e A_3 non coincidono più, pertanto si viene a creare un ulteriore campo rispetto ai precedenti, che rappresenta due situazioni diverse a seconda che la composizione sia ipoeutettoide o ipereutettoide. Nel primo caso il basso contenuto di carbonio crea una regione delimitata da una curva, sotto la temperatura A_3 , in cui col procedere del tempo l'austenite si trasforma progressivamente in ferrite. Nel caso di composizione ipereutettoide invece si osserva la comparsa di una linea orizzontale chiamata A_{cm} , sopra la quale si ha il campo di esistenza dell'austenite stabile, inoltre si ha una curva denominata C_s che indica i tempi oltre cui si ha l'inizio della trasformazione da austenite a cementite, mentre è necessario abbassare ulteriormente la temperatura sotto A_1 per avere la comparsa di perlite.

La forma del grafico delineata per composizioni diversa dall'eutettoide si complica ulteriormente se si pensa che in qualsiasi acciaio sono presenti anche altri elementi oltre al ferro e il carbonio. Tali elementi in generale determinano una traslazione verso destra delle curve e ne modificano più o meno profondamente la forma, assumendo un aspetto sempre più complesso

all'aumentare del loro numero e della loro concentrazione, coinvolgendo tutte le regioni del grafico. Un esempio di tali grafici è riportato qui di seguito

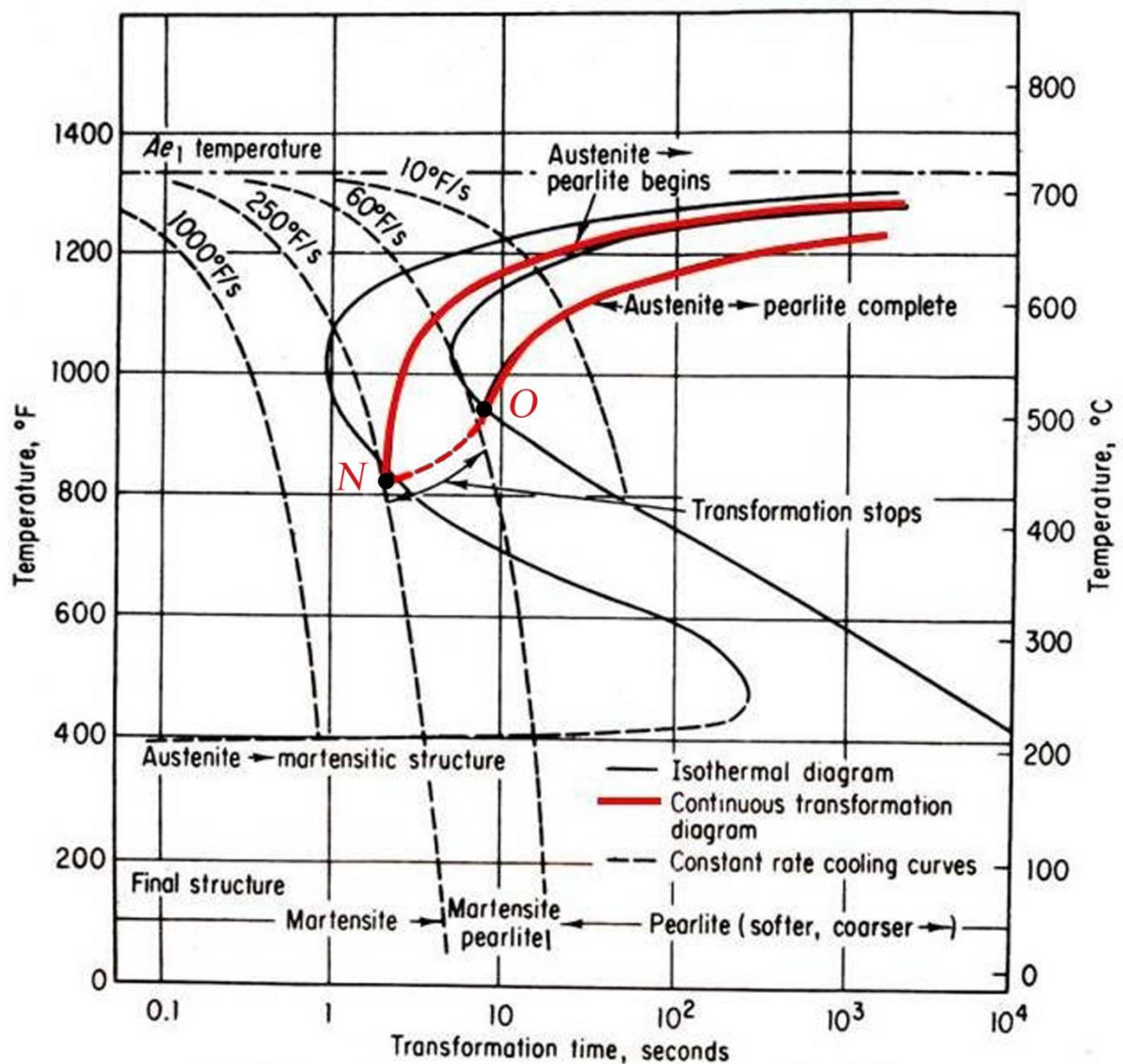


Infine si rimarca come le curve non dipendano esclusivamente dalla composizione, bensì anche dalla temperatura e dal tempo di austenizzazione, che si ripercuotono sulla grandezza del grano austenitico, che maggiore è e maggiore è il tempo necessario per la comparsa delle strutture perlitiche. Inoltre influisce anche la distribuzione delle fasi non metalliche, che in generale accelera il processo di trasformazione, con conseguente spostamento delle linee rappresentanti l'inizio e la fine delle trasformazioni.

L'utilizzo di queste curve quindi consente di ricavare il tempo per cui deve essere mantenuta una certa temperatura di lavorazione per ottenere la struttura finale voluta.

2.7.2. Trasformazioni austenitiche anisoterme

Nella maggior parte dei trattamenti termici industriali cui vengono sottoposti gli acciai le temperature non vengono mantenute costanti, bensì raffreddati a velocità costante secondo precise traiettorie, si è quindi in un regime di trasformazione austenitica anisoterma. I dati ricavati da questi esperimenti permettono di tracciare i cosiddetti diagrammi C.C.T., di cui il seguente grafico è un esempio.



Continuous Cooling-Transformation (C-T) Diagram

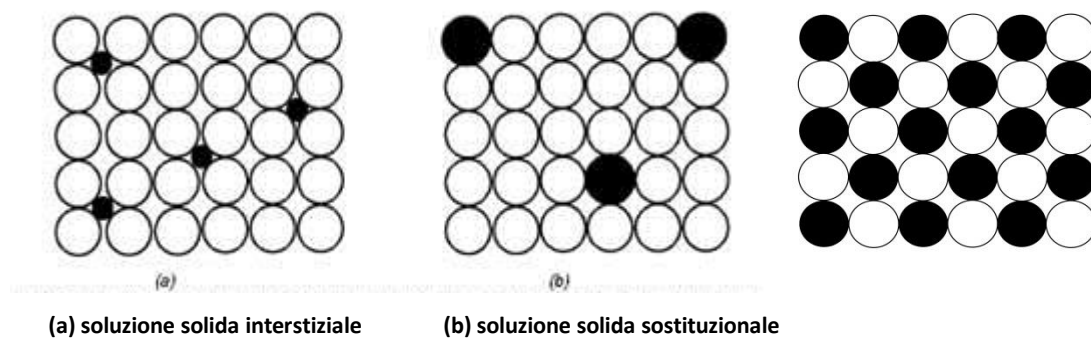
(Derived from the isothermal-transformation diagram for a plain-carbon eutectoid steel)

In questo caso per poter tracciare i diagrammi si raffreddano i provini con velocità differenti e si segnano i punti in cui iniziano e finiscono le

trasformazioni. Rispetto al caso delle trasformazioni isoterme si nota che le trasformazioni iniziano a temperature inferiori e richiedono tempi maggiori, pertanto le curve risultano traslate verso il basso e verso destra, fatto che migliora le possibilità di tempra del materiale. Inoltre sono contraddistinte da una particolarità che le differenzia in modo sostanziale dalle curve di Bain, ovvero si interrompono a un certo valore di temperatura e tempo, in quelli che nel grafico sono segnati come i punti N e O. Se la trasformazione ha una traiettoria passante per il segmento congiungente questi due punti, essa si arresterà per poi riprendere nel momento in cui incontra la linea orizzontale M_s , dopo la quale la parte di austenite rimanente inizia a trasformarsi in martensite. Anche in questo caso vale quanto detto in precedenza per quanto concerne la forma e la posizione delle curve, ossia vengono notevolmente influenzate dalla quantità di carbonio e dagli elementi di lega presenti.

2.8. Difetti reticolari

Il ripetersi delle strutture principali viste va quindi a costituire una serie di piani orientati in maniera differente all'interno dei singoli cristalli dalla cui unione nasce il cosiddetto reticolo cristallino, nel quale si integrano gli elementi di lega in maniera diversa a seconda della loro dimensione atomica. Difatti atomi di grandezza simile a quella del ferro prendono il posto dei suddetti atomi mantenendo la forma reticolare già illustrata andando a costituire quelle che vengono chiamate soluzioni solide di sostituzione, mentre quelli più piccoli prendono posizione nei vuoti interstiziali, formando le soluzioni interstiziali. Proprio per questi motivi la presenza degli elementi di lega in diverse quantità influenza molto il comportamento e le proprietà meccaniche degli acciai dando luogo a una moltitudine di complessi comportamenti.



Dalle immagini si vede come nel caso delle soluzioni solide di sostituzione la disposizione degli elementi all'interno del reticolo atomico può essere casuale o regolare. Nel primo caso la distribuzione degli atomi è completamente irregolare, tuttavia mantenendo il materiale a una data temperatura per un tempo sufficiente si può ottenere una ridistribuzione degli atomi per formare un reticolo regolare con conseguente comportamento ad elevata durezza e fragilità, completamente in controtendenza con la situazione di reticolo disordinato caratterizzato da elevata duttilità e malleabilità.

Da quanto detto emerge che di fatto questi elementi vanno a costituire delle irregolarità nella struttura di base del metallo, pertanto il loro studio va approfondito per comprenderne le possibili evoluzioni.

Esistono diversi tipi di difetti reticolari, la loro estensione può essere molto variabile ed è possibile classificarli nel seguente modo:

- puntiformi
- lineari
- superficiali: superficie del metallo, difetti di impilamento
- volumetrici: micro e macro vuoti, inclusioni non metalliche, segregazioni

2.8.1. I difetti puntiformi

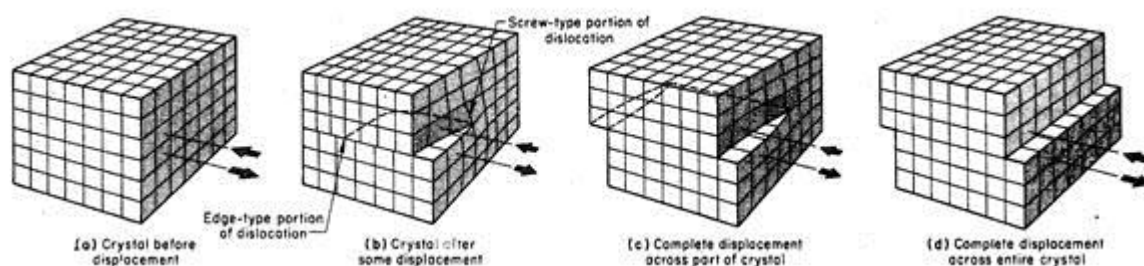
I difetti puntiformi sono quelli che interessano un unico punto del reticolo e sono: vacanze, atomi sostituzionali o interstiziali. Come già accennato lo studio delle vacanze è di particolare interesse perché ricoprono un ruolo fondamentale nei fenomeni diffusivi e la loro concentrazione spaziale è legata proporzionalmente ed esponenzialmente alla temperatura.

Per i difetti puntiformi in generale va sottolineato come siano inclini a “precipitare”, ossia tendono a formare dei piccoli raggruppamenti che possono arrivare a divenire dei veri e propri aggregati tridimensionali di difetti che hanno ripercussioni sulle proprietà meccaniche dei materiali, un esempio possono essere dei pori all’interno della struttura.

2.8.2. I difetti lineari

2.8.2.1. La teoria delle dislocazioni

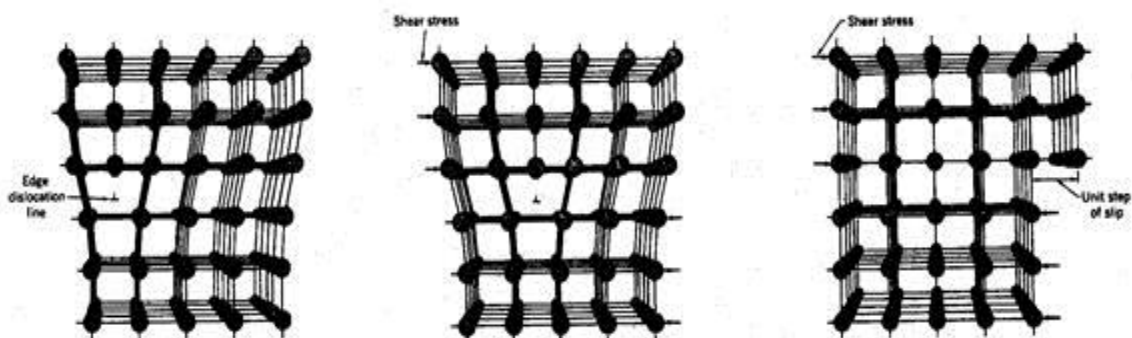
Per quanto concerne i difetti lineari si ritiene utile accennare alla “Teoria delle dislocazioni”. Per dislocazione si intende la modifica delle condizioni iniziali reticolari in concomitanza con l’applicazione di uno sforzo, che facendo scorrere un piano reticolare va a deformare microscopicamente in modo plastico e irreversibile il reticolo, come mostrato dalla seguente figura.



Tale deformazione plastica si verifica quando lo sforzo applicato supera un determinato valore critico, che può essere calcolato analiticamente nell'ipotesi che i piani siano privi di difetti e scorrano relativamente in modo rigido, anche se si rileva che in generale questo porta a una sovrastima del σ_{critico} . La spiegazione di questa sovrastima è insita nell'ipotesi di reticolo perfetto, non veritiera, e questo fa presupporre la presenza di un difetto lineare, cui ci si riferisce col termine di dislocazione. Attraverso questo concetto si può immaginare che le deformazioni plastiche non siano lo spostamento contemporaneo di un gran numero di atomi come si supposeva, bensì uno spostamento di un piccolo numero di atomi, conseguenza del fatto che lo sforzo applicato rompe un numero limitato di legami, che porta a una ridisposizione degli atomi nello spazio. Questo meccanismo certamente necessita di un'energia minore, come riscontrato anche dalla discrepanza tra le misure empiriche e i calcoli analitici. La dislocazione è dunque la linea che divide il piano che ha subito uno scorrimento dal piano che non l'ha subita, e da sé quindi che lo scorrimento di una dislocazione comporta il progredire di una deformazione microscopica.

Esistono due tipi di dislocazione:

- a vite: quando la deformazione imposta è parallela al piano formato dalla dislocazione. Questo tipo di difetto termina alla superficie del cristallo oppure forma un anello chiuso insieme a un'altra dislocazione
- a spigolo: solitamente sono localizzate alla fine di un semipiano atomico aggiuntivo situato perpendicolarmente al piano di scorrimento, come mostrato nella seguente figura



Le dislocazione creano nel loro intorno uno stato tensionale, differente a seconda del tipo con cui si ha a che fare, e solitamente si presentano a carattere misto, nel senso che ci si può ricondurre all'interazione dei due tipi visti, in questo caso prendono il nome di dislocazioni curvilinee.

Da quanto detto finora quindi si capisce che le dislocazioni si possono muovere con una certa facilità nel loro piano di scorrimento, perché per fare ciò non è richiesta diffusione, bensì un movimento degli atomi intorno alla loro posizione reticolare, che dà luogo a una deformazione plastica.

2.8.2.1.1. Il vettore di Burgers

Per caratterizzare una dislocazione per: entità, direzione e verso si è soliti utilizzare il vettore di Burgers. Esso può essere parallelo o perpendicolare alla dislocazione a seconda che questa sia a vite o a spigolo e si calcola con un procedimento chiamato circuitazione di Burgers, che è il seguente: si parte da un punto arbitrario nel quale si vuole calcolare tale vettore e si compiono in una direzione una certa quantità di passi reticolari, ci si sposta poi in direzione perpendicolare alla prima della stessa quantità e si replicano le stesse operazioni nei versi opposti ai primi andando quindi a cercare di comporre un quadrato chiuso. Tuttavia risulterà un quadrato chiuso solo nel caso in cui il reticolo sia privo di difetti, in caso contrario si avrà una spezzata aperta e chiudendola si va a individuare il vettore di Burgers, il quale viene convenzionalmente indicati con “b”.

2.8.2.2. La moltiplicazione delle dislocazioni

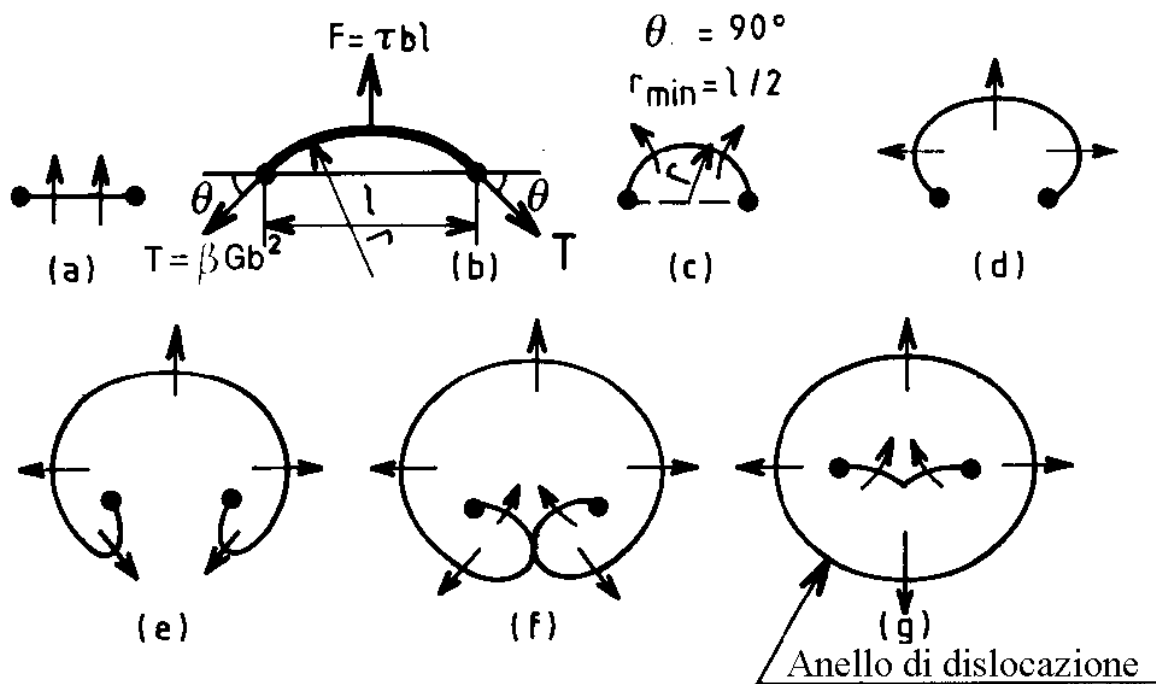
Particolarmente rilevante è anche la moltiplicazione delle dislocazioni, che può essere spiegata attraverso il meccanismo di Frank – Read. In risposta a una sollecitazione gli atomi sono spostati dalle loro posizioni di equilibrio, quindi si può presupporre che essi abbiano immagazzinato una certa energia potenziale elastica, che si può intendere come energia di formazione della dislocazione, che tende a renderla rettilinea e il cui valore numerico varia per ogni diverso tipo di dislocazione. Per comprendere il meccanismo di formazione si consideri un segmento di dislocazione rettilineo bloccato agli estremi e posto in un piano di scorrimento, il quale si incurva applicando una sollecitazione netta di taglio esprimibile come:

$$\tau * b * x$$

dove x è la distanza tra i punti del segmento, b il vettore di Burgers e τ lo sforzo di taglio.

Sotto l'azione di questa forza la dislocazione inizia ad inarcarsi e lo fa sempre più al crescere di quest'ultima andando a formare inizialmente una

semicirconferenza, posizione instabile per la dislocazione. Successivamente se il valore della forza applicata aumenta ancora i lembi tendono a formare una circonferenza completa, avvicinandosi progressivamente l'un l'altro fino a toccarsi. In questo momento si ha formazione di un anello chiuso completo, che è libero di espandersi e un nuovo segmento rettilineo avente gli stessi estremi del primo originante il meccanismo e dal quale ripartirà poi la stessa successione appena enunciata.



Questo processo spiega a livello macroscopico il fenomeno dell'incrudimento conseguente alle deformazioni plastiche, tipiche soprattutto delle lavorazioni a freddo e da cui il materiale risulta rinforzato in generale, perché le dislocazioni interferiscono reciprocamente bloccandosi, infatti due dislocazioni uguali e opposte si annullano, aumentando però i difetti puntiformi con conseguente miglioramento delle proprietà meccaniche.

2.8.2.3. I moti delle dislocazioni

Per quanto riguarda invece il moto delle dislocazioni c'è da dire che esso tende ad arrestarsi ai bordi dei grani nelle quali si manifestano, andando a modificarne la forma, che risulta allungata nella direzione dello sforzo. Inoltre si deve sottolineare come il loro movimento è reso difficile: dalla presenza di ostacoli, come ad esempio: precipitati, atomi estranei e accumuli di dislocazioni, inoltre varia per diversi valori di temperatura.

In generale i meccanismi con cui una dislocazione può superare un ostacolo sono i seguenti:

- meccanismo di Orowan, o teoria di Orowan, è un modello che spiega il comportamento deformativo e l'indurimento conseguente a sollecitazioni che deformano il materiale in passi successivi. L'esperienza ha evidenziato che per poter deformare un materiale cristallino sono richiesti sforzi crescenti al crescere della deformazione e questo implica un innalzamento del limite elastico e ciò deriva dal fatto che le dislocazioni, migrando incontrano grani di precipitato, giunti, altre dislocazioni ecc, che per essere superate richiedono energie maggiori. Le dislocazioni tendono quindi ad addensarsi attorno a questi ostacoli, arcuandosi contro essi e formando un anello attorno ai grani aventi dimensioni maggiori. In questo modo il materiale risulta rinforzato e il suo maggiore limite elastico permette di avere una maggiore resistenza alle deformazioni. Il materiale risulta quindi incrudito, ossia maggiormente resistente alle deformazioni
- salto
- scorrimento deviato: in cui la dislocazione slitta su un piano di scorrimento parallelo a quello di origine perché questo richiede un quantitativo di energia minore rispetto alla scalata
- taglio di una particella
- non superamento e conseguente accumulo delle dislocazioni in corrispondenza dell'ostacolo

2.8.3. Difetti superficiali

Passando invece ai difetti superficiali c'è da dire che essi vengono identificati come veri e propri difetti di superficie del metallo, ai bordi dei grani o nei cosiddetti difetti di impilamento.

Per quanto concerne le superfici si può affermare che la loro perfetta planarità è impossibile da raggiungere e che rappresentano un'interruzione del reticolo cristallino.

I difetti di impilamento invece coinvolgono i piani atomici dalla cui unione nascono le strutture elementari formanti il reticolo. Ogni tipo di struttura cristallina ha una propria sequenza di impilamento, tuttavia può accadere che questa venga alterata e si generi quindi un difetto. L'origine di questo difetto può essere un'aggregazione di vacanze e interstiziali su un piano, oppure una deformazione plastica.

Un altro difetto, assimilabile ai difetti di impilamento, è la geminazione. Questa consiste nel movimento coordinato di più atomi situati sullo stesso piano e il risultato finale è un reticolo simmetrico rispetto a un determinato piano, chiamato piano di geminazione. Questa deformazione, alternativa allo scorrimento, interessa volumi anche discreti del cristallo, che perde localmente la sua orientazione iniziale. Per ripristinare la situazione originaria ogni atomo deve essere spostato di una quantità fissata dalla sua distanza rispetto al piano di geminazione.

Anche le superfici di interfaccia tra fasi solide diverse possono essere considerate come difetti, difatti il caso di totale coerenza tra i due piani atomici è solamente ideale. Nella realtà pratica può accadere che i piani siano pressoché combacianti e in questo caso gli sforzi trasmessi sono circa nulli, ma il caso più frequente è quello in cui le due fasi hanno distanze interplanari differenti, che generano uno stress elastico all'interfaccia. Oppure può accadere che le due fasi non abbiano alcun tipo di legame e in questo caso si parla di interfaccia incoerente.

2.8.4. Difetti tridimensionali

Tra quelli che vengono definiti difetti volumetrici ci sono sicuramente le cosiddette inclusioni non metalliche, che costituiscono un'interruzione del reticolo metallico. Queste vengono individuate attraverso un esame al microscopio e possono essere divise in due categorie che le differenzia per la loro provenienza:

- endogene: ossia quelle che vengono a formarsi all'interno del bagno metallico come conseguenza di reazioni chimiche che hanno luogo durante il processo produttivo, tipici esempi sono gli ossidi prodotti durante l'ossidazione o la disossidazione per precipitazione, oppure i solfuri che si separano per precipitazione durante la solidificazione
- esogene: vale a dire quelle che provengono dall'esterno del bagno

In generale le inclusioni non metalliche non sono desiderate in quanto abbassano il limite di resistenza a fatica e aumentano l'usura dei macchinari utilizzati per le lavorazioni. I parametri che permettono di classificare al meglio la loro pericolosità sono: forma, proprietà fisiche e loro variazione in corrispondenza delle temperature cui si effettuano le lavorazioni a caldo.

Possono verificarsi le seguenti eventualità:

- le inclusioni solidificano ad alte temperature, maggiori di quelle di fabbricazione, per cui in generale assumono forma tondeggianti, e maggiori di quelle delle lavorazioni, pertanto si hanno delle cavità entro cui queste rimangono contenute, che allungano la loro forma nel verso della lavorazione. Le cavità divengono quindi simili a dei fili che non compromettono la struttura in sé, ma introducono un'anisotropia che porta il materiale ad avere una minore resistenza alle sollecitazioni nel senso perpendicolare alla lavorazione
- le inclusioni sono solide ma malleabili alla temperatura di lavorazione, quindi conservano meglio la loro forma rispetto al caso precedente
- il composto è indeformabile alle temperature di lavorazione, in questo caso può accadere che si frantumi e in questo caso si hanno i frammenti derivanti dalla rottura che si dispongono allineati nel senso della lavorazione, oppure conservano completamente la loro forma, andando però a creare intorno a sé delle microlesioni che di fatto diminuiscono la sezione resistente, difatti sono frequenti le rotture, soprattutto per pezzi di piccole dimensioni

- stesso caso analogo al precedente, tuttavia se l'inclusione ha forma cristallina durante la lavorazione si ha anche il rischio che il cristallo, attraverso le sue asperità fenda il metallo andando a creare piccole lacerazioni che possono portare a conseguenze disastrose in esercizio

L'esame per il controllo delle inclusioni non metalliche andrebbe realizzato sia prima, sia dopo la lavorazione a caldo, tuttavia questo secondo controllo è più importante perché consente di stabilire l'idoneità al servizio del metallo, inoltre gli standard qualitativi sempre più alti mirano alla massima eliminazione di questi composti in modo da produrre acciai sempre più puliti e performanti, anche attraverso l'incentivazione di un'equa dispersione di particelle fini.

Anche le segregazioni sono un difetto. Esse derivano dalla distribuzione disomogenea dei componenti del metallo, che possono addensarsi in particolari zone, le quali risultano avere delle proprietà fisico-meccaniche differenti dal loro intorno. Questo fenomeno si manifesta soprattutto al centro dei lingotti, in quello che viene definito il cono di ritiro, difatti durante la solidificazione i primi cristalli si formano a contatto con le pareti delle forme, perché in questa zona il raffreddamento è più rapido, e sono caratterizzati da elevata purezza. Le impurità quindi tendono a essere spinte verso il centro, ossia la parte che solidifica dopo, difatti si vedrà successivamente che durante la lavorazione parte di questo materiale verrà scartato, proprio perché ricca di elementi indesiderati e di composizione eterogenea.

3. Classificazione acciai

Come già accennato in precedenza la composizione chimica degli acciai è molto complessa e varia.

Grazie all'enorme passo avanti della tecnologia nella seconda metà del XX secolo si sono fatti passi da gigante in quella che oggi viene definita la "Scienza dei Materiali", che ha permesso di comprendere come ognuno degli elementi costituenti una lega permetta di conseguire diverse proprietà meccaniche in funzione di due aspetti principalmente:

- la loro presenza espressa in % sul peso totale
- le lavorazioni cui vengono assoggettati i materiali durante il ciclo di produzione, le cui grandezze maggiormente importanti sono la temperatura e il tempo per cui queste temperature vengono mantenute

Da questo secondo punto si può capire come si siano sviluppati una grande varietà di processi industriali atti a soddisfare le richieste sempre più specifiche del mercato, con la contemporanea necessità di rimanere competitivi economicamente e rispettare le normative di carattere ecologico per la salvaguardia dell'energia e delle risorse naturali attraverso un'ottimizzazione del processo produttivo.

Per poter scegliere al meglio un materiale ed essere in grado di coglierne la sua applicabilità in un certo campo è necessario tenere conto dei seguenti fattori:

- proprietà fisiche e meccaniche al variare della temperatura e del tempo
- resistenza al deterioramento (fatica, corrosione, usura ecc)
- lavorabilità: a caldo, a freddo, saldabilità ecc
- disponibilità sul mercato
- necessità di trattamenti termici

Si può quindi intuire come di fatto siano infinite le combinazioni realizzabili per ottenere un determinato prodotto e che ogni diversa composizione presenta una peculiarità a livello di proprietà e composizione chimico-fisica. Questo crea il problema di poter classificare in modo efficace e pertinente i prodotti in modo da fornire una classificazione univoca, che possa indicare efficacemente il principale campo di applicabilità dell'acciaio in analisi. Prendendo come riferimento la normativa UNI EN 10027 : 2006 la classificazione degli acciai può essere effettuata suddividendo la categoria in due principali gruppi:

- gruppo 1: in base al tipo di impiego previsto o le sue caratteristiche meccaniche o fisiche
- gruppo 2: in base alla composizione chimica

nella normativa presa come riferimento viene adottata la classificazione del gruppo 1, pertanto gli acciai riportati saranno indicati con una lettera R, che indica il campo di applicazione delle rotaie, seguito da un numero indicante la durezza di Brinell, che indica il valore minimo di durezza di un acciaio affinché esso possa entrare a far parte di quella categoria. Questo parametro in ferrovia viene preferito alla resistenza a trazione in quanto più veloce ed economico da misurare, inoltre si ritiene dia un'indicazione più significativa agli esperti del settore.

Nel seguito si riportano i tipi di acciai considerati dalla normativa UNI EN 13674, che è cogente in Italia in quanto recepita dall'ente di Unificazione Nazionale Italiano (UNI). Gli acciai considerati sono denominati come segue:

Nome	Durezza (HBW)	Descrizione
R200	200 – 240	C – Mn , non termicamente trattato
R220	220 – 260	C – Mn , non termicamente trattato
R260	260 – 300	C – Mn , non termicamente trattato
R260 Mn	260 – 300	C – Mn , non termicamente trattato
R320 Cr	320 – 360	legato (1% Cr), non termicamente trattato
R350 HT	350 – 390	C – Mn , termicamente trattato
R350 LHT	350 – 390	Basso contenuto di elementi leganti , termicamente trattato

3.1. Composizione chimica

Per ognuno di questi acciai viene data un'indicazione di massima per quanto riguarda la composizione chimica, che viene poi integrata con una serie di test di laboratorio atti a stabilire che il materiale, oltre a rispettare i requisiti sulla composizione chimica, abbia anche una serie di proprietà meccaniche e fisiche, difatti l'armamento deve essere in grado di sopportare notevoli sollecitazioni statiche e dinamiche, senza né rompersi, né deformarsi in modo da poter garantire sempre un elevato grado di sicurezza. Questi acciai quindi sono caratterizzati da un elevato carico di snervamento, quindi un elevato limite elastico, inoltre devono essere abbastanza duttili e tenaci ², per non dare luogo a pericolose e improvvise rotture fragili.

Nella seguente pagina si riporta la tabella presa dalla normativa, che indica le massime percentuali di ogni elemento che è possibile trovare all'interno di ogni acciaio. Le concentrazioni vengono indicate sia allo stato solido che a quello liquido in modo da poter effettuare un maggior numero di controlli durante le lavorazioni.

Al fine di comprendere meglio le motivazioni che portano a stabilire la composizione che devono avere gli acciai si ritiene utile riportare le principali conseguenze dovute all'apporto dei singoli elementi. Tali conseguenze si complicano molto nel caso di contemporanea presenza di più elementi a causa delle loro interazioni reciproche, tuttavia si possono comunque dedurre effetti benefici o dannosi dati dalla loro presenza.

² la tenacità è la capacità di un materiale di assorbire energia senza rompersi. Nel caso ferroviario tale energia può derivare da urti, sovraccarichi dinamici o basse temperature

Steel sample grade	% By mass											10 ⁻⁴ % (ppm) max.	
	C	Si	Mn	P max.	S	Cr	Al max.	V max.	N max.	O ^a	H ^b		
200	Liquid	0,40/0,60	0,15/0,58	0,70/1,20	0,035	0,008/0,035	0,15 max	0,004	0,030	0,009	20	3,0	
	Solid	0,38/0,62	0,13/0,60	0,65/1,25	0,040	0,008/0,040	0,15 max	0,004	0,030	0,010	20	3,0	
220	Liquid	0,50/0,60	0,20/0,60	1,00/1,25	0,025	0,008/0,025	0,15 max	0,004	0,030	0,008	20	3,0	
	Solid	0,50/0,60	0,20/0,60	1,00/1,25	0,025	0,008/0,025	0,15 max	0,004	0,030	0,008	20	3,0	
260	Liquid	0,62/0,80	0,15/0,58	0,70/1,20	0,025	0,008/0,025	0,15 max	0,004	0,030	0,009	20	2,5	
	Solid	0,60/0,82	0,13/0,60	0,65/1,25	0,030	0,008/0,030	0,15 max	0,004	0,030	0,010	20	2,5	
260 Mn	Liquid	0,55/0,75	0,15/0,60	1,30/1,70	0,025	0,008/0,025	0,15 max	0,004	0,030	0,009	20	2,5	
	Solid	0,53/0,77	0,13/0,62	1,25/1,75	0,030	0,008/0,030	0,15 max	0,004	0,030	0,010	20	2,5	
320	Liquid	0,60/0,80	0,50/1,10	0,80/1,20	0,020	0,008/0,025	0,80/1,20	0,004	0,18	0,009	20	2,5	
	Solid	0,58/0,82	0,48/1,12	0,75/1,25	0,025	0,008/0,030	0,75/1,25	0,004	0,20	0,010	20	2,5	
350	Liquid	0,72/0,80	0,15/0,58	0,70/1,20	0,020	0,008/0,025	0,15 max	0,004	0,030	0,009	20	2,5	
	Solid	0,70/0,82	0,13/0,60	0,65/1,25	0,025	0,008/0,030	0,15 max	0,004	0,030	0,010	20	2,5	
350 LHT	Liquid	0,72/0,80	0,15/0,58	0,70/1,20	0,020	0,008/0,025	0,30 max	0,004	0,030	0,009	20	2,5	
	Solid	0,70/0,82	0,13/0,60	0,65/1,25	0,025	0,008/0,030	0,30 max	0,004	0,030	0,010	20	2,5	

3.1.1. Carbonio

Questo elemento è il costituente principale dell'acciaio e permette di aumentare la resistenza del materiale più di qualunque altro, a fronte di spese basse. Le quantità aggiunte non eccedono determinati valori perché alla sua aggiunta corrisponde una sensibile riduzione della tenacità, pertanto se ne utilizza il minimo indispensabile

3.1.2. Silicio

Il silicio, come il manganese, è un elemento sempre presente negli acciai. Lo si incontra in quantità pari almeno allo 0,2 – 0,5 % e influenza notevolmente le proprietà elettriche e magnetiche del ferro. Questo elemento influenza anche le proprietà meccaniche andando ad aumentare molto la resistenza a trazione, il limite di snervamento e la durezza, tuttavia diminuiscono progressivamente allungamento, strizione e resilienza fino a raggiungere valori praticamente nulli per contenuti intorno al 5%. Vi sono anche altri effetti da menzionare: tra quelli favorevoli si ricordano l'effetto sulla temprabilità con la riduzione della velocità critica di raffreddamento, la maggiore resistenza ad ambienti acidi e corrosivi e un'ottima resistenza all'ossidazione a caldo. Tra gli svantaggi invece la riduzione della velocità di diffusione del carbonio con conseguenti problemi di cementazione, la diminuzione della deformabilità a freddo, della saldabilità, dovuta alla comparsa di silicati difficili da eliminare dalla zona di fusione, e la tendenza al surriscaldamento, che porta all'ingrossamento dei grani.

3.1.3. Manganese

Il manganese è un elemento solubile in tutte le proporzioni nel ferro ed è sempre presente all'interno degli acciai per circa lo 0,7 – 1,2% , perché viene largamente utilizzato nei processi produttivi come disossidante e desolforante. L'aggiunta di questo elemento all'acciaio presenta vantaggi e svantaggi, tra i primi si possono elencare:

- riduzione delle temperature di ricottura e tempra
- diminuzione della velocità minima di raffreddamento, con la quale si può ottenere la tempra completa
- aumento della penetrazione di tempra e riduzione delle deformazioni durante tale trattamento
- aumento della tenacità a parità di resistenza a trazione, si noti che il nichel è più efficace per questo obiettivo
- elevato aumento della resistenza a trazione, pari a circa 100 N/mm^2 per ogni 1% di manganese presente, contro lo 0,12% di carbonio necessario per ottenere lo stesso miglioramento
- miglioramento della deformazione a caldo, conseguenza dell'elevato effetto disossidante e desolforante di questo elemento

Tra gli svantaggi invece si nota una diminuzione della conducibilità termica, che comporta la necessità di un elevato livello di cura nelle operazioni di riscaldamento e raffreddamento, perché non devono crearsi squilibri di temperatura troppo elevati all'interno dei pezzi, altrimenti potrebbero crearsi tensioni interne che potrebbero portarli a rottura, soprattutto se il tenore di carbonio è alto. Per le operazioni di tempra invece è necessario che esse vengano effettuate in olio per minimizzare la tendenza alla fessurazione, inoltre è molto importante prestare particolare attenzione alla temperatura cui si effettua tale operazione, perché aumenta anche la sensibilità al surriscaldamento, per cui può esserci anche un aumento delle dimensioni dei grani. Altri inconvenienti sono: la diminuzione della deformabilità alle basse temperature degli acciai perlitici, il peggioramento delle proprietà magnetiche ed elettriche e gli inconvenienti nella cementazione.

3.1.4. Zolfo

Lo zolfo, come anche il fosforo, è considerato un elemento desiderato solo per i cosiddetti acciai automatici lavorati ad alta velocità alle macchine utensili, mentre per il resto delle applicazioni è considerato un' impurezza, pertanto la sua presenza deve essere ridotta al minimo.

Uno gli effetti di questo elemento è la fragilità a caldo, o fragilità al rosso, derivante dalla formazione di un composto avente temperatura di fusione pari a circa 988 °C, mentre solitamente le operazioni di fucinatura, stampaggio e laminazione hanno temperature maggiori di 1000 °C, si viene a creare quindi una situazione in cui il composto, che tende a disporsi ai bordi dei grani, diviene liquido e compromette la struttura che può creparsi o addirittura andare letteralmente in pezzi.

Inoltre lo zolfo tende a legare molto con altri elementi formando solfuri che presentano temperature di fusione diverse, che maggiori sono e più migliorano la lavorabilità a caldo, come quelli formati con cromo, zirconio e manganese, mentre non sono desiderati quelli formati con: nichel, cobalto e molibdeno.

Altro problema è la scarsa miscibilità e diffusione allo stato solido, che creano problemi di omogeneità della composizione, perché tendono a formare inclusioni non metalliche chiaramente visibili al microscopio, le cui dimensioni non devono eccedere determinati valori in modo da non minare la continuità metallica. Questo accade praticamente sempre al centro del lingotto, ma non solo e per questo motivo i contenuti di questo elemento non sono tollerati in misure maggiori allo 0,04%.

Infine per quanto riguarda le proprietà meccaniche si nota un peggioramento a livello generale, particolarmente accentuato per la resilienza, soprattutto in presenza di elevati tenori di C.

3.1.5. Fosforo

Il fosforo ha effetti simili a quello dello zolfo, tuttavia a differenza di quest'ultimo si scioglie nell'acciaio anche allo stato solido. Il suo effetto sulla resilienza è molto forte, tanto che questa precipita a circa zero già per contenuti pari allo 0,2%, inoltre peggiora la lavorabilità a freddo e tende molto a segregare. Per questi motivi il suo contenuto mediamente non supera lo 0,03%.

3.1.6. Cromo

Il cromo è un elemento che ha una spiccata tendenza ad ossidarsi, per questo motivo, nel processo produttivo viene aggiunto solamente una volta completata la disossidazione, inoltre forma anche carburi molto stabili. Il cromo influenza le proprietà fisiche dell'acciaio, determina una diminuzione della conducibilità termica e un aumento della resistività. Per quanto concerne invece le proprietà meccaniche, finché si rimane nel campo delle strutture perlitiche, si ha un aumento della resistenza a trazione cui si accompagnano lievi diminuzioni di: allungamento, strizione e resilienza.

Il cromo ha anche la capacità di influenzare molto la temprabilità, dando la possibilità di realizzare raffreddamenti ad aria per pezzi piccoli, inoltre conferisce notevole stabilità al rinvenimento. Altre proprietà interessanti ai fini pratici sono l'elevata resistenza ad attrito, alta resistenza all'ossidazione a caldo e l'inossidabilità rispetto a molti agenti corrosivi.

3.1.7. Alluminio

L'alluminio è un elemento che ha un elevato potere disossidante soprattutto a caldo, simile a quello del silicio. Quando si ossida può formare allumina, che è molto dannosa perché va a costituire un'inclusione non metallica che peggiora resilienza e proprietà al "traverso". L'alluminio ostacola la diffusione del carbonio e combinato con l'azoto forma nitruri molto duri, che compongono la base per gli acciai da nitrurazione. Infine si nota un peggioramento della saldabilità già con contenuti pari allo 0,4 % e aumenta la resistività. Negli acciai di fabbricazione corrente è tollerato in quantità $< 0,004\%$.

3.1.8. Vanadio

Il vanadio ha proprietà analoghe a quelle del cromo, pertanto anche esso ha una spiccata tendenza a formare carburi e ha gli stessi effetti del cromo sugli acciai, tuttavia ha anche le seguenti particolarità:

- ha potere disossidante fortissimo, difatti durante il processo produttivo viene sempre aggiunto poco prima della colata a disossidazione già avvenuta, tuttavia continua ad avere la tendenza a rimuovere le ultime tracce di ossigeno e passare nelle scorie
- grazie al suo grande potere disossidante il materiale risulta avere una maggiore resistenza nei confronti di sollecitazioni dinamiche e ripetute
- diminuisce la temprabilità perché sottrae carbonio alla matrice metallica per formare carburi, il che implica la necessità di temperature di tempra più alte per poter disciogliere i composti creatisi
- ha la tendenza ad affinare il grano ferritico e di conseguenza si riduce la sensibilità al surriscaldamento, facilitando i trattamenti termici
- concentrazioni crescenti di vanadio chiudono progressivamente il campo di esistenza del ferro γ
- aumenta la resistenza a caldo, mentre saldabilità e lavorabilità risultano circa invariate

3.1.9. Azoto

Lo studio degli effetti ottenuti dall'aggiunta di questo elemento sono interessanti perché coinvolto nel cosiddetto processo di "nitrurazione", grazie al quale si può dare all'acciaio una durezza superficiale adeguata. Per quanto riguarda le proprietà meccaniche si rileva un leggero aumento di resistenza a trazione, allungamento e strizione a discapito di un'azione sfavorevole nei confronti dell'invecchiamento. Infine c'è da segnalare come l'azoto espanda il campo di esistenza dell'austenite.

3.1.10. Ossigeno

L'ossigeno è sicuramente l'elemento più dannoso per le proprietà dell'acciaio, in quanto ad esso possono essere attribuite le influenze:

- peggioramento delle proprietà meccaniche
- peggioramento di alcune proprietà fisiche
- peggioramento della lavorabilità a caldo perché aumenta la fragilità alle alte temperature
- aumento della sensibilità al surriscaldamento con conseguente restrizione dell'intervallo di temperatura utile per la tempra

Fortunatamente l'ossigeno ha una solubilità molto bassa nell'acciaio allo stato solido, pertanto la stragrande maggioranza dell'ossigeno presente negli acciai appartiene agli ossidi, che fanno parte delle inclusioni non metalliche, componenti che soprattutto negli ultimi anni si è cercato di eliminare sempre più, in modo da poter contare su acciai sempre più "puliti" e performanti.

3.1.11. Idrogeno

Per ciò che concerne il contenuto di idrogeno va innanzitutto specificato che esso deve essere il minimo possibile, difatti la presenza di questo elemento porta con sé un notevole calo delle proprietà meccaniche come: resilienza, allungamento, strizione, numero di torsioni e piegamenti alternati a fronte unicamente di un lieve aumento di resistenza. Esso ha gravi effetti già a partire da quantità nell'ordine dello 0,0001% e porta con sé un notevole infragilimento del materiale dovuto al fatto che essendo un atomo molto piccolo prende posizioni interstiziali nel reticolo deformandolo e creando delle tensioni interne. Inoltre può essere assorbito durante la colata, in quanto presente in atmosfera, oppure attraverso dei processi di elettrolisi.

L'idrogeno può essere anche responsabile della formazione di alcuni difetti come ad esempio delle caratteristiche rigonfiature, microcavità e fessure in cui prende posizione, oppure i cosiddetti fiocchi, che hanno una caratteristica forma approssimativamente circolare, aspetto brillante e cristallino e si formano all'interno del metallo laddove delle quantità di idrogeno sono rimaste intrappolate nel reticolo a causa di raffreddamenti troppo rapidi andando a formare delle piccole fessure rettilinee che possono propagarsi sotto l'azione delle sollecitazioni fino a provocare rotture. La loro formazione è particolarmente temibile se le dimensioni del pezzo sono notevoli e avviene durante il raffreddamento a una temperatura compresa tra i 100 e i 300 °C, range nel quale la pressione dell'idrogeno è maggiore della coesione del metallo.

3.1.12. Altri elementi

Oltre agli elementi già visti che possono far parte della composizione chimica di un acciaio, ce ne sono altri, come: molibdeno, nichel, rame, titanio, stagno, antimonio e niobio, le cui concentrazioni vanno limitate per evitare l'insorgere di una serie di problemi derivanti dall'eccesso di questi elementi, sui quali si fa luce nel seguito. Si riporta la tabella presa dalla normativa in cui le massime concentrazioni degli elementi sono espresse in percentuale sul peso totale

	Mo	Ni	Cu	Sn	Sb	Ti	Nb
200, 220, 260, 260 Mn	0.2	0.1	0.15	0.030	0.020	0.025	0.01
320 Cr	0.2	0.1	0.15	0.030	0.020	0.025	0.01
350 HT	0.2	0.1	0.15	0.030	0.020	0.025	0.01
350 LHT	0.2	0.1	0.15	0.030	0.020	0.025	0.01

Inoltre per i diversi tipi di acciaio la somma di alcuni elementi non deve superare determinati valori come riportato nel seguito:

	Cu & 10 Sn		
200, 220, 260, 260 Mn	0.35	Cr + Mo + Ni + Cu + V	0.35
320 Cr	0.35	Ni + Cu	0.16
350 HT	0.35	Cr + Mo + Ni + Cu + V	0.25
350 LHT	0.35	Mo + Ni + Cu + V	0.20

Indaghiamo ora sugli effetti dell'aggiunta dei singoli elementi appena visti su una lega di acciaio.

3.1.12.1. Molibdeno

Il molibdeno è un elemento che tende a formare carburi molto duri e stabili quando disciolto nel ferro, i suoi principali effetti sull'acciaio sono:

- aumenta la temprabilità, anche più del cromo
- aumenta la durezza
- aumenta la stabilità della martensite alle alte temperature
- migliora il limite di fatica e lo scorrimento a caldo
- permette di conservare una buona lavorabilità
- andando verso concentrazioni pari al 3% si chiude il campo di esistenza del ferro γ

3.1.12.2. Nichel

Il Nichel è un elemento che ha scarsa tendenza a reagire nell'acciaio in quanto non si ossida e non ha la tendenza a formare carburi stabili. Solitamente entra a far parte della colata perché presente nei rottami oppure viene aggiunto sotto forma di catodi. A questo elemento si può attribuire una diminuzione della temperatura di ricottura e di tempra, che implicano minori temperature critiche e di conseguenza minori oneri, inoltre diminuisce la velocità critica, pertanto è possibile realizzare la tempra anche con mezzi di raffreddamento meno forti, come ad esempio olio, che riduce il rischio di spaccature durante le lavorazioni, soprattutto per pezzi grandi e di forme irregolari. La bassa velocità critica permette anche alla tempra di avere una penetrazione migliore, quindi una differenza di caratteristiche meccaniche minore tra il centro e la superficie del pezzo, problema che è tanto più grande quanto maggiori sono le dimensioni del pezzo. A parità di resistenza a trazione la presenza di nichel aumenta la tenacità, ossia la capacità di un materiale di assorbire energia e tramutarla in deformazioni, motivo per cui solitamente è un elemento desiderato per acciai impiegati alle basse temperature.

3.1.12.3. Rame

Il rame è un elemento che arriva a far parte della lega perché presente nei rottami, tuttavia ne va controllata la percentuale presente, difatti piccole aggiunte possono essere utili ad aumentare la resistenza di acciai esposti ad agenti atmosferici. Al rame si può attribuire anche un miglioramento delle caratteristiche meccaniche a caldo, cui però si accompagna un peggioramento della duttilità alle alte temperature per tenori maggiori dell'1,7%, andando a limitare la deformabilità, questo è dovuto al fatto che il rame è poco solubile nel ferro γ e questo comporta il suo accumulo ai bordi dei grani austenitici durante le operazioni di raffreddamento, cosa che comporta la formazione di una fase a bassa temperatura di fusione, la cui resistenza è minore di quella degli ordinari grani austenitici, che favorisce cedimenti prematuri, il risultato quindi è un comportamento fragile.

Per quanto concerne la combinazione del rame con altri elementi è significativo citare la sua combinazione con lo stagno, difatti in presenza di quest'ultimo il rame tende ancora di più a segregare al bordo dei grani con il meccanismo appena visto. Opposto è invece l'effetto della presenza di nichel, che porta il rame a non segregare, contrastando quindi l'infragilimento.

Infine si sottolinea che concentrazioni inferiori allo 0.6% non influenzano lavorabilità a freddo e saldabilità.

3.1.12.4. Titanio

Il titanio, come il cromo, è un elemento che tende a ridurre il campo di esistenza del ferro γ , fino a chiuderlo per suoi contenuti pari all'1%. La sua aggiunta in bassi tenori affina leggermente i grani ed è utilizzato soprattutto per la produzione di acciai microlegati ad alta resistenza, oppure può essere utilizzato come disossidante o denitrurante.

Ha la tendenza a formare il composto TiN, che può produrre delle microlacerazioni nel materiale, pericolose soprattutto per gli elementi molto sollecitati a fatica. Inoltre la sua presenza comporta anche una diminuzione della resilienza, ovvero la capacità di un materiale a resistere all'applicazione di carichi impulsivi.

Il titanio ha caratteristiche simili anche al niobio e al tantalio, infatti insieme al primo può indurre un aumento della fragilità a caldo, che è un effetto indesiderato, mentre tutti e tre, avendo una buona tendenza a formare carburi, vengono utilizzati nella produzione di acciai inossidabili austenitici.

3.2. Controlli

La normativa, oltre alla composizione, fornisce anche indicazioni per quanto concerne le frequenze con cui vanno effettuati controlli durante il processo produttivo, è interessante notare come non tutte le classi vengano trattate allo stesso modo, difatti la 350 HT e la 350 LHT hanno requisiti più restrittivi, andando quindi a formare un materiale di particolare pregio.

Si riporta la tabella indicante i requisiti minimi di conformità alla normativa

	200 220 260 260Mn 320Cr	350HT 350LHT
Composizione chimica	uno per trattamento	uno per trattamento
Idrogeno	uno per trattamento (due per il primo della sequenza) ^a	uno per trattamento (due per il primo della sequenza)
Ossigeno totale	uno per sequenza	uno per sequenza ^a
Microstruttura	non richiesto per 200 220 260 uno ogni 1000t o parte di esse per 260Mn e 320Cr	uno ogni 50t di materiale ritrattato ^{a,c} uno ogni 100t di materiale trattato ^{a,c}
Decarburazione	uno ogni 1000t o parte di esse ^{a,b}	uno ogni 500t di materiale trattato o ritrattato ^{a,c}
Pulizia ossidi	uno per sequenza ^{a,b}	uno per sequenza ^{a,b,c}
Solfuri	uno ogni 500t o parte di esse ^{a,b}	uno ogni 500t o parte di esse ^{a,b,c}
Durezza	uno per trattamento ^{a,b}	uno ogni 50t di materiale ritrattato ^{a,c} uno ogni 100t di materiale trattato ^{a,c}
Resistenza a trazione	uno per trattamento/uno ogni 2000t ^{a,b}	uno ogni 1000t ^{a,c}

^a i campioni devono essere presi a caso, ma solo da rotaie realizzate fuori dalla mixing zone del lingotto se si utilizza un processo di colata continua

^b i campioni devono essere tagliati dopo la laminazione

^c i campioni devono essere prelevati da rotaie trattate termicamente

Per ognuno di questi controlli vengono indicate le modalità con cui essi devono essere eseguiti e si ritiene opportuno approfondire tale argomento.

3.2.1. Composizione chimica

Per quanto concerne la composizione chimica essa va determinata sia allo stato liquido, che a quello solido e in quest'ultimo caso è necessario che il provino sia prelevato dalla stessa posizione utilizzata per il test di resistenza a trazione. I valori da rispettare sono gli stessi dati nella precedente tabella.

3.2.2. Contenuto di idrogeno

Il contenuto di idrogeno va misurato prima allo stato liquido attraverso la misura della pressione nel liquido, che si consiglia di effettuare attraverso un sistema denominato "online immersion probe system". La misurazione va condotta per ogni lavorazione, con particolare attenzione alla prima, per la quale sono richiesti due campioni, a ogni misurazione deve essere usato un nuovo campionatore e nel caso della prima lavorazione un campione deve essere prelevato nel momento in cui la concentrazione è massima. I valori da rispettare sono dati nella prossima tabella

Trattamento	Contenuto di idrogeno 10^{-4} % [ppm]	
	acciaio 200 e 220	tutti i restanti acciai
Gruppo 1	$\leq 3,0$	$\leq 2,5$
Gruppo 2	$> 3,0$	$> 2,5$

I provini appartenenti al gruppo 1 devono risultare idonei, mentre quelli appartenenti al gruppo 2 vanno raffreddati lentamente o trattati termicamente e testati solamente quando hanno assunto la forma della rotaia.

Se non vengono rispettati i valori riportati in tabella, i lingotti realizzati prima di queste prove devono essere raffreddati lentamente oppure trattati termicamente.

Allo stato solido invece i campioni vanno prelevati al momento del loro taglio in modo casuale e almeno uno per lavorazione. Il materiale deve essere prelevato dal centro del fungo e in corrispondenza dell'ultimo pezzo della prima colata. Qualora un qualunque test non rispettasse i parametri previsti la lavorazione andrebbe respinta.

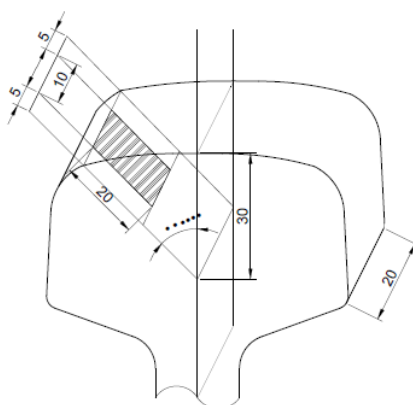
3.2.3. Contenuto di ossigeno

La normativa EN 10276-1 chiarisce tutto ciò che riguarda la preparazione dei provini per questa prova. La determinazione del contenuto di ossigeno va effettuata attraverso una strumentazione automatica su un campione liquido lasciato solidificare, oppure prelevando un provino dalla testa del fungo della rotaia in posizioni standard.

Come riportato nella precedente tabella i controlli vanno effettuati alla fine della sequenza delle lavorazioni, quindi la normativa differenzia i controlli per ordinazioni maggiori o minori di 5000 tonnellate. Per i primi si tollera un contenuto di ossigeno di 20 ppm per il 95% del materiale in questione, mentre per il restante 5% la concentrazione comunque non deve essere superiore alle 30 ppm. Per ordini di entità inferiore alle 5000t invece si effettua un'unica prova il cui risultato è sufficiente che sia un valore compreso tra le 20 e le 30 ppm.

Qualora da una prova risultasse una concentrazione maggiore di 30 ppm il lotto va respinto, mentre se una misurazione eccede le 20 ppm, tutte le successive dovranno essere minori di tale valore.

Anche per quanto concerne gli ossidi si mantiene la distinzione per ordinazioni maggiori o minori di 5000t. La prova deve essere effettuata su uno degli ultimi pezzi prodotti dopo l'ultimo trattamento del processo. I campioni prelevati devono essere due e vanno presi dal fungo della rotaia, inoltre devono essere preparati e prelevati conformemente alla normativa di riferimento, la DIN 50602, che stabilisce come posizione ottimale quella indicata nel seguente disegno

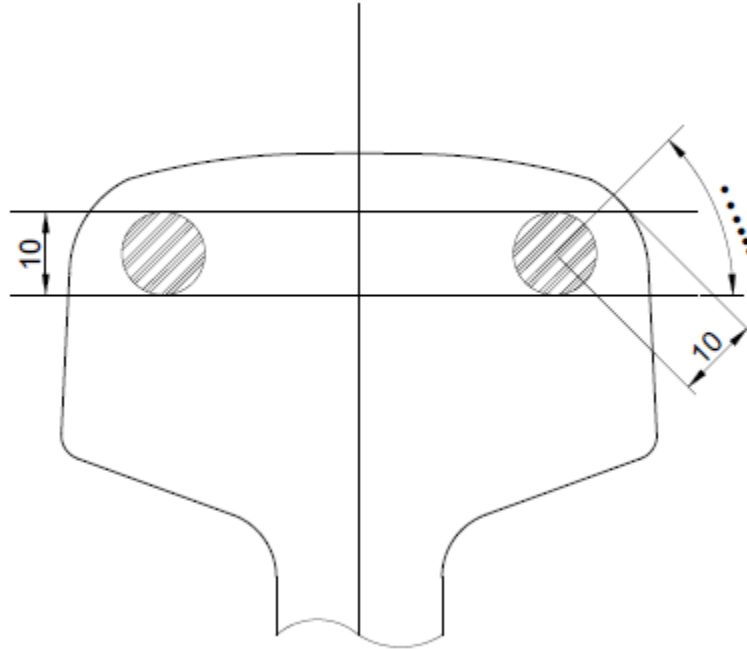


I test devono dare risultati che non eccedano i seguenti valori:

- $10 < K_3 < 20$ per il 5% dei provini
- $K_3 < 10$ per il restante 95%

3.2.4. Controllo microstrutturale

La microstruttura degli acciai deve essere verificata attraverso strumenti che consentano di avere un ingrandimento almeno pari a 500 e va effettuata nella posizione prevista dalla normativa, che è riportata nella seguente figura:

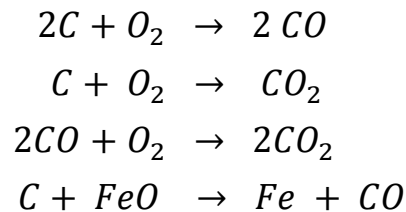


Per ogni diverso tipo di materiale la normativa riporta delle caratteristiche microstrutturali che vanno verificate in sede di analisi, e sono le seguenti:

- 200 e 220: la loro struttura deve essere costituita da perlite e ferrite, importante verificare l'assenza di cementite, martensite e bainite
- 260 e 260Mn: devono avere struttura completamente perlitica, tuttavia sono permessi piccoli quantitativi di ferrite, per i quali la normativa riporta delle foto utilizzabili come riferimento. Anche in questo caso va verificata l'assenza di strutture bainitiche, martensitiche o di cementite
- 320Cr: hanno composizione completamente perlitica, non sono ammesse altre fasi
- 350 HT e 350 LHT: valgono le medesime considerazioni fatte per i tipi 260 e 260Mn

3.2.5. Decarburazione

La decarburazione è un processo che mira alla riduzione del contenuto di carbonio attraverso una sua reazione con l'ossigeno, che ha come prodotti monossido di carbonio e anidride carbonica. Il processo avviene secondo le seguenti reazioni chimiche:



Per quanto concerne questo controllo la normativa specifica che non si devono osservare reti di ferrite sotto i 0,5 mm di profondità misurati in un punto qualsiasi della testa della rotaia. Il mezzo con cui viene misurata la profondità della decarburazione è una prova di durezza, la cui modalità si specificherà nell'apposito paragrafo, che viene condotta in tre punti differenti a seguito di un'operazione di brillantatura e il cui risultato non deve essere minore del valore minimo di durezza appartenenza al tipo di acciaio testato, ulteriormente ridotto al massimo di 7 unità, ad esempio per un acciaio 220 i valori riscontrati non potranno essere inferiori a 213 HBW.

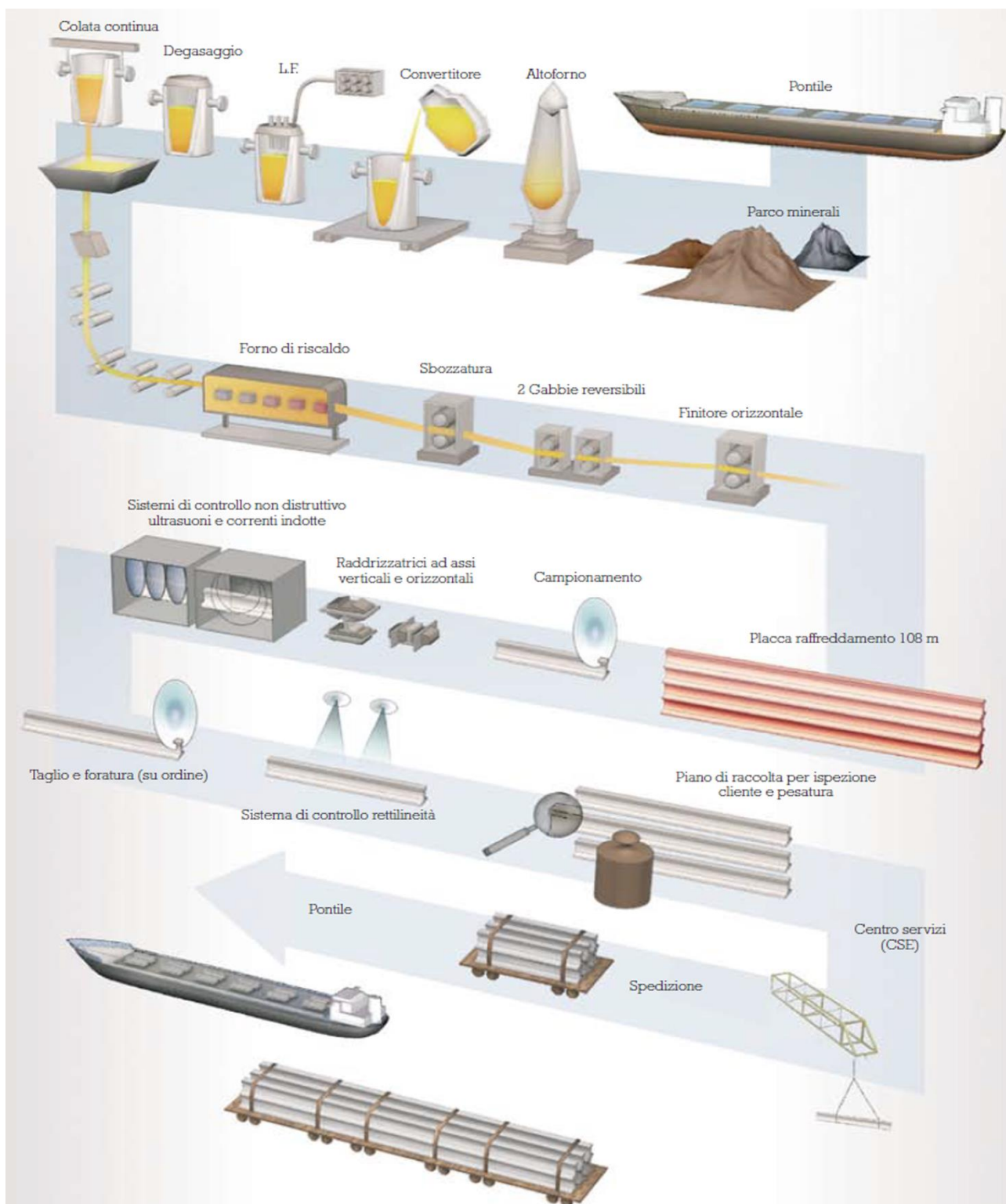
3.2.6. Procedure di riprova

Qualora un test non rispettasse i requisiti specificati per ogni prova è necessario operare due test su campioni prelevati dalle zone adiacenti al primo, appartenenti alla stessa rotaia che ha dato esito negativo. Qualora anche questi provini dessero esito negativo, si continua con questa stessa procedura finché non si trova materiale rispettante i requisiti. Tutto il materiale che non supera le prove deve essere scartato, tranne nel caso del materiale trattato termicamente, che deve essere ritrattato e ritestato.

Se il risultato derivante dalle equazioni predittive indicasse che la rotaia non rispetta le specifiche volute, l'accettazione del pezzo deve essere stabilita attraverso un test di resistenza a trazione, i cui valori di accettabilità sono esplicitati nel seguito.

4. Processo produttivo

Il processo produttivo che porta al prodotto finito metallico alterna operazioni di diverso carattere e in definitiva risulta complesso e lungo. Un processo tipico può essere quello riportato in figura, che mostra il ciclo di produzione continua utilizzato dalla Lucchini Spa, leader italiano nella produzione di rotaie.



Ogni produttore può affidarsi a un fornitore per quanto concerne l'approvvigionamento delle materie prime, tuttavia esso dovrà essere unico per un'unica fornitura e avere un certificato di sistema di gestione per la qualità ai sensi della normativa UNI EN ISO 9001:2000, che sancisce i requisiti minimi di accettabilità dei sistemi di qualità.

4.1. Materie prime

Il primo problema con cui si ha a che fare durante le operazioni metallurgiche è l'approvvigionamento di materie prime, più nello specifico di minerali. Si rendono quindi necessarie una serie di operazioni preliminari atte ad ottenere un metallo avente requisiti consoni alla destinazione finale del prodotto.

In prima analisi si possono distinguere tre diversi tipi di processo:

- pirometallurgico: contraddistinto da alte temperature, necessarie affinché abbiano luogo le reazioni chimiche attraverso cui si ottengono i metalli a partire dai loro composti costituenti minerali
- elettrolitico: si avvale di energia elettrica grazie a cui può realizzare processi elettrolitici di estrazione
- idrometallurgico: utilizza soluzioni liquide, generalmente acquose, per separare i metalli dai minerali

Parlando della produzione di rotaie si ha a che fare con processi pirometallurgici, alla fine dei quali si ottiene metallo grezzo, che può essere più o meno puro in funzione della quantità di elementi "estranei" al suo interno. In generale quindi si rende necessaria la presenza di altre operazioni, oggetto delle prossime pagine, atte a stabilizzare la composizione chimica entro un intervallo reputato accettabile per ogni diverso elemento presente.

Le materie prime di maggior importanza per il processo produttivo sono i minerali, seguiti dai rottami, che hanno acquisito un'importanza sempre maggiore nel tempo.

4.1.1. I minerali

Per quanto concerne i giacimenti minerali la prima cosa da dire è che alcuni metalli, come ad esempio: alluminio, ferro, magnesio e titanio sono più facili da trovare rispetto ad altri perché presenti in maggior quantità sul nostro pianeta. I giacimenti di maggiori dimensioni in cui le concentrazioni dei metalli sono molto alte si stanno esaurendo sempre più e questo impone lo sfruttamento di quelli più piccoli, di conseguenza è sempre più difficile estrarre i metalli, quindi si impone un continuo cambiamento e perfezionamento dei procedimenti.

Tuttavia al fine di valutare la convenienza dell'adozione di un sito per l'approvvigionamento non bisogna valutare unicamente il tenore del metallo di interesse, bensì anche: la composizione chimica del minerale, la presenza di elementi indesiderati per lo scopo finale che potrebbero essere difficili se non impossibili da eliminare, l'accessibilità alla miniera, la presenza di vie di comunicazione e altri fattori, pertanto si comprende come sia sempre più difficoltosa l'individuazione di un giacimento ideale.

Ad oggi i minerali maggiormente sfruttati per la metallurgia sono: ossidi, carbonati, solfati, solfuri, silicati e antimoniuri. In generale questi minerali sono molto affini a ossigeno e zolfo, i cui effetti malefici sul prodotto finale sono stati enunciati in precedenza, pertanto non possono essere direttamente utilizzati come i metalli nativi, la cui presenza è ormai minima. Gli ossidi sono i più semplici da trattare e sfruttare, inoltre alcuni minerali che non sono ossidi possono essere facilmente trasformati in essi. Più complessa è invece la trattazione dei solfuri, per i quali c'è sempre il problema dell'eliminazione dello zolfo, inoltre in loro presenza si è spesso forzati a dover trattare con altri composti come arseniuri e antimoniuri.

Per ossidi aventi composizione eterogenea e temperature di fusione molto alte e per i minerali ricchi di solfuri si è elaborato un procedimento di produzione denominato "tecnica delle matte", ossia delle scorie aventi alto contenuto di solfuri e bassa temperatura di fusione. La formazione della matta deriva da un arricchimento di zolfo, da cui vengono successivamente separati i metalli di maggiore interesse attraverso dei processi di ossidazione.

Spesso le scorie prodotte durante le lavorazioni sono ricche di elementi pregiati presenti sotto forma di ossidi, pertanto vengono trattate nuovamente in modo

da recuperarne i metalli di maggiore interesse e rendere più conveniente sotto il profilo economico l'intero processo.

4.1.2. Rottami e recuperi

In alcuni casi i rottami sono la principale fonte di approvvigionamento del processo produttivo, tanto che esistono impianti di produzione appositamente concepiti solo per essi, di cui i principali sono le acciaierie a forno elettrico. Il loro utilizzo consente un elevato grado di riciclo, aspetto sempre più fondamentale in ottica di ecosostenibilità e di risorse non rinnovabili.

La raccolta dei rottami è un'operazione che non va sottovalutata, difatti è fondamentale valutarne soprattutto la composizione chimica, perché possono essere presenti delle impurezze, la cui quantità non deve superare determinati valori normati in modo da non pregiudicarne l'impiego e soprattutto la lavorazione, infatti più è puro un materiale e minore sarà la sua necessità di ricevere trattamenti di affinazione.

La materia prima può essere recuperata anche dai rifiuti di altri trattamenti metallurgici oppure da particolari lavorazioni chimiche, in questo caso si parla di recuperi.

4.2. Operazioni preliminari

Prima di avviarsi alle lavorazioni vere e proprie il materiale subisce una serie di operazioni preliminari fondamentali per preparare il metallo al processo.

Un'operazione che viene condotta generalmente è la frantumazione, che ha il compito di rendere il metallo di una pezzatura idonea alle operazioni successive, inoltre costituisce la base dell'altra operazione preliminare che solitamente viene condotta, ossia l'arricchimento.

L'arricchimento è un'operazione necessaria a separare il materiale ricercato dalla ganga, che è il termine con cui si indica la porzione indesiderata, e viene reputata sempre più essenziale in quanto permette di sfruttare giacimenti a basso contenuto di materia prima. Può essere di due tipi:

- magnetico: può essere applicato per separare i materiali magnetici, o materiali che lo diventano dopo l'arrostimento, dalla ganga
- flottazione: applicata soprattutto per arricchire i solfuri e i materiali che si comportano come essi dopo opportune lavorazioni, è un'operazione in cui di fatto le polveri miste vengono messe in acqua contenente agenti flottanti. Dentro la soluzione vengono sviluppate delle bollicine che dal basso risalgono verso la superficie e tendono ad aderire ai solfuri, che lasciandosi bagnare difficilmente galleggiano, mentre la ganga tende a impregnarsi immediatamente, andando a fondo. È un'operazione molto complessa, i cui reagenti vanno concepiti appositamente per il materiale su cui si sta lavorando.

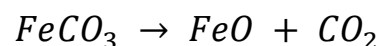
Esistono anche altre tecniche di arricchimento oltre a quelle appena enunciate, come ad esempio quella per decrepitazione, per galleggiamento e quella elettrostatica.

L'arricchimento ha i seguenti vantaggi: permette di abbassare i costi per la manipolazione di materiale di grande dimensione e per il trasporto, riduce i consumi di fluidificanti, combustibili e le perdite di metallo. Per quanto concerne i possibili inconvenienti derivanti da questa lavorazione invece si devono menzionare: la pezzatura troppo fine, che può rendere necessaria un'operazione di agglomerazione, e difficoltà di essiccamento derivante dalla notevole quantità di umidità.

4.3. Pretrattamento dei minerali

I minerali devono essere pretrattati prima di essere lavorati, le operazioni cui vengono sottoposti mirano a trasformarli chimico–fisicamente in modo da eliminare le tracce di elementi indesiderati e rendere più semplice e meno onerosa l'estrazione dei metalli. Le operazioni tipiche cui vengono assoggettati sono: l'essiccazione, la calcinazione, la conglomerazione e l'arrostimento. Queste operazioni possono avvenire anche contemporaneamente e comportano tutte l'apporto di calore, pertanto andrebbero inserite tra i trattamenti pirometallurgici, tuttavia sono ormai la base di tutti i processi produttivi.

Entrando più nello specifico si può dire che la calcinazione è un'operazione condotta in assenza di aria, che per semplice riscaldamento mira a dissociare ossidi metallici e allontanare le componenti volatili attraverso il compiersi di una reazione chimica producente anidride carbonica, come ad esempio:



la temperatura cui far avvenire reazione deve essere la maggiore possibile, senza che si verificano né fusione, né agglomerazione del materiale. Al fine di effettuare una buona lavorazione è necessario tenere sotto controllo molti aspetti come: porosità e pezzatura del minerale, sua costituzione ecc.

Come accennato un'altra operazione condotta preliminarmente è l'arrostimento, essa probabilmente è l'operazione più importante, nonché quella maggiormente utilizzata e consiste nell'utilizzo di un agente estraneo al minerale, che a una temperatura sufficientemente elevata induce una trasformazione chimica nel minerale desiderato, tramutandolo da solfuro a ossido, in modo che successivamente se ne possa ricavare il metallo per riduzione. Per completare il procedimento sono essenzialmente quattro le alternative possibili:

- l'arrostimento su suola, in cui il minerale si presenta in una pezzatura già piccola derivante dalla frantumazione. Questo viene mescolato in un'atmosfera appositamente concepita per indurre la trasformazione desiderata, in modo che tutta la superficie dei granelli venga a contatto con questa, a volte è presente anche un combustibile

- l'arrostimento in letto fluido consiste nell'immersione del materiale all'interno di un fluido, la cui temperatura deve essere uniforme e scrupolosamente controllata, in cui vi è una griglia di distribuzione grazie a cui si inietta una miscela gassosa
- un'altra alternativa è polverizzare il minerale e iniettarlo in una camera di combustione, in tal modo l'arrostimento è immediato, completo e uniforme. Questo procedimento prende il nome di arrostitimento iniettato
- l'arrostimento soffiato, in cui il minerale, misto a un combustibile, viene attraversato da una corrente di aria in pressione, in questo modo il minerale risulta anche agglomerato, vantaggio che ha reso tale procedimento largamente utilizzato soprattutto per minerali minuti

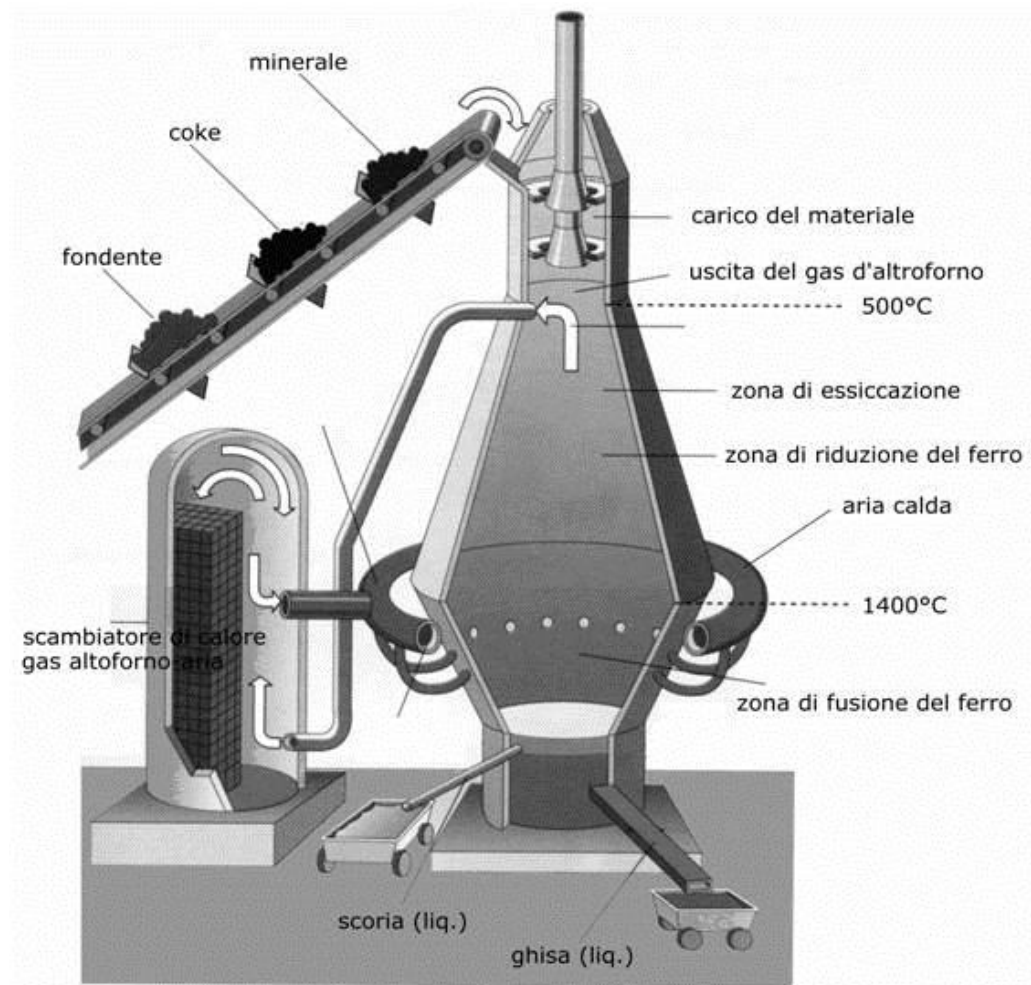
l'arrostimento è un'operazione molto complessa da realizzare ed è fondamentale che l'agente trasformante, fulcro della trasformazione, venga scelto propriamente.

Mancano infine l'essiccazione, che si commenta da sé, e la conglomerazione. Quest'ultima può essere necessaria qualora il materiale si presenti troppo fine dopo la macinazione, oppure vi siano delle polveri accumulate derivanti dalla manipolazione dei materiali, perché il materiale introdotto nell'altoforno non può essere troppo fine, altrimenti si rischia l'intasamento.

4.4. Prima fusione

Dopo aver portato a termine le operazioni di preparazione e pretrattamento dei minerali si ha la prima fusione del metallo, da cui si ricava metallo grezzo misto a una quantità di scoria più o meno grande in base alla quantità di elementi non desiderati contenuta nel minerale. Uno dei procedimenti maggiormente utilizzati per la produzione dell'acciaio da rotaia è la conversione della ghisa, la cui produzione può essere effettuata attraverso l'utilizzo di un altoforno.

Per poter comprendere al meglio l'intero processo produttivo è interessante approfondire il funzionamento di un altoforno, questo infatti rappresenta ancora oggi il mezzo maggiormente utilizzato per la prima fusione nell'ambito dei materiali ferrosi. Questi impianti possono raggiungere altezze anche di 40 m, hanno pareti in materiale refrattario il cui spessore cresce dall'alto verso il basso fino a raggiungere anche 1m e possono essere schematizzati come nella seguente figura:

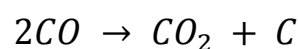


Questi forni vengono caricati con minerali, fondenti e carbone, quest'ultimo principalmente presente sotto forma di coke, ossia un tipo di carbone artificiale ottenuto dal riscaldamento di carbon fossile, l'insieme dei componenti citati prende il nome di letto di fusione. Degli ugelli posizionati in basso immettono nel bagno liquido una corrente di aria calda, chiamata vento, che viene preriscaldata fino a una temperatura di circa 1000 °C e tendendo a salire verso la bocca agevola la combustione del coke.

Dalla foto si può notare come il forno sia diviso in diverse parti: partendo dal basso incontriamo per primo il crogiolo, che ha il compito di raccogliere la ghisa e le scorie fuse accumulate sul fondo. Nella sua parte superiore sono applicati dei fori in cui vengono applicati gli ugelli, mentre nella sua parte inferiore si trovano dei fori utilizzati per colare la ghisa e la loppa. Sopra il crogiolo si trova la sacca, che con la sua forma cilindrica allarga la sezione trasversale. Queste due zone sono refrigerate esternamente da acqua perché contraddistinte da altissime temperature. Salendo ulteriormente si incontrano: il tino cilindrico, che è il punto in cui il diametro è massimo, il tino e infine la bocca, che è il punto da cui il letto di fusione viene introdotto alla lavorazione.

Un'altra suddivisione che può essere operata è quella in zone in funzione delle trasformazioni che subisce il materiale durante la sua discesa e l'aria durante la sua risalita. Si possono individuare sei diverse zone:

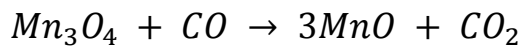
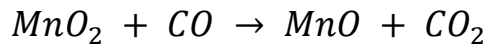
- zona 1: è la più in alto, in cui il materiale inizia a scaldarsi fino a una temperatura intorno ai 400 °C, così facendo perde tutta la sua umidità
- zona 2: in questa zona il materiale raddoppia la sua temperatura raggiungendo circa 800 °C e avviene la seguente reazione



che viene definita di riduzione indiretta ed ha come conseguenza la dissociazione del monossido di carbonio e la deposizione del carbonio piroforico. È importante sottolineare che andando verso la zona 3, possono verificarsi condizioni per le quali la reazione può risultare invertita, quindi il carbonio tende a scomparire per formare monossido, cosa che non deve avvenire perché porta a un consumo prematuro di carbonio, necessario per la successiva combustione.

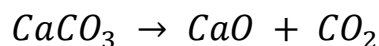
- zona 3: qui il materiale raggiunge anche i 1350 °C ed è soggetto a riduzione diretta a opera del carbonio, reazione che comporta anche l'assorbimento di molto calore, motivo per cui la reazione avviene nelle parti della zona in

cui le temperature superano i 900 °C. Qui avviene anche la riduzione degli ossidi di manganese secondo le reazioni:



la riduzione completa del manganese necessita un notevole assorbimento di calore, motivo per cui potrà completarsi esclusivamente nella successiva zona dell'altoforno contraddistinta da una maggiore temperatura.

In questa zona si ha anche la dissociazione del calcare, anch'essa endotermica, secondo la reazione:



proprio grazie a questa reazione, che assorbe molto calore, la temperatura dei gas alla bocca viene molto ridotta e questo permette di limitare la zona in cui avvengono reazioni dirette, a favore di quelle indirette, che economicamente sono molto più vantaggiose perché al posto che assorbire calore lo producono.

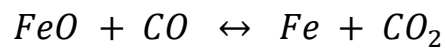
In questa zona infine si segnalano l'inizio della carburazione del ferro e la comparsa delle prime scorie

- zona 4: in questa parte la temperatura sale ancora fino a toccare i 1600 °C e di conseguenza si ha la fusione di tutto il materiale presente, ad eccezione del coke. Inoltre la temperatura è responsabile della carburazione della spugna di ferro, formatasi in zona 3, e della fusione del ferro carburato dal quale si forma ghisa fusa, cui si annettono tutti gli elementi ridotti: Si, Mn, P e S. Si segnala anche la formazione della loppa finale
- zona 5: in questa zona la temperatura del vento raggiunge anche i 2000 °C e si ha la formazione di CO, perché l'aria bollente uscente dagli ugelli incontra immediatamente il carbone e questo dà luogo a una combustione violenta da cui si forma CO₂, che venendo in contatto con il carbone incandescente si riduce creando monossido di carbonio
- zona 6: in quest'ultima zona si trova il crogiolo, nel quale viene separata la ghisa dalla loppa, materiale di scarto che una volta macinato ha caratteristiche simili al cemento. Inoltre avvengono anche le ultime reazioni chimiche, in generale endotermiche, pertanto si ha un abbassamento della temperatura rispetto alla zona precedente raggiungendo i 1600 °C circa

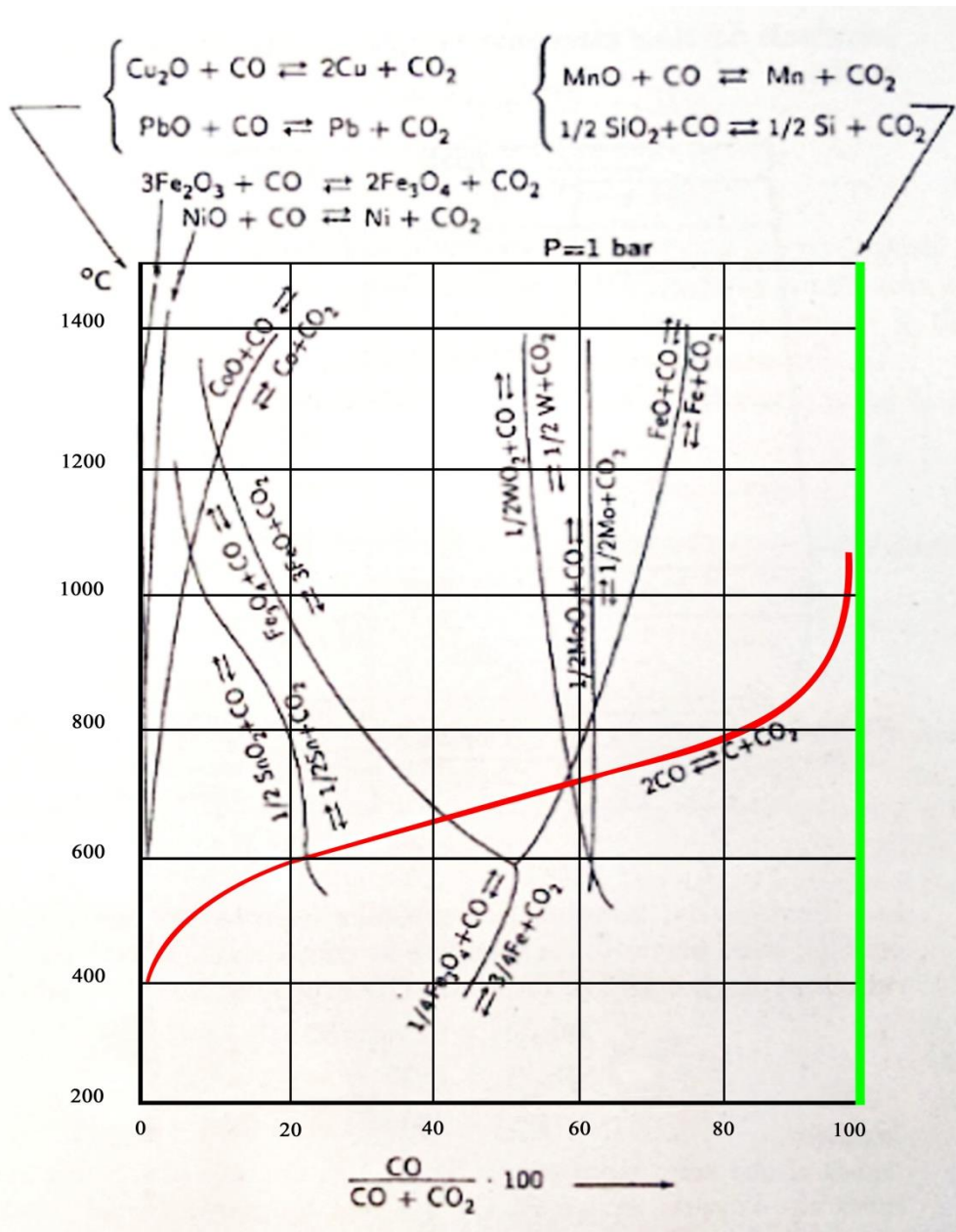
La riduzione dei minerali ferrosi all'interno dell'altoforno avviene ad opera di carbonio (C) e monossido di carbonio (CO). Questa modalità ha prevalso su

altre, perché con l'ossigeno, ad esempio, le temperature industrialmente raggiungibili non sono sufficienti a dissociare per solo riscaldamento molti degli ossidi che si incontrano. Esistono metodi per diminuire le temperature a cui avviene la dissociazione, tuttavia il loro impiego è sconveniente sia per motivi economici, sia tecnici. Un'altra possibilità è rappresentata dall'idrogeno, che opera formando acqua, tuttavia esso è molto costoso e instabile, motivi per cui il suo utilizzo è ancora scarso.

Alla luce di quanto detto i riduttori di gran lunga maggiormente utilizzati sono appunto C e CO, quindi è utile considerare le seguenti reazioni che avvengono tra questi e gli ossidi di ferro:



Sulle reazioni appena viste si possono fare le seguenti considerazioni: per poter espletare la prima reazione, già da temperature relativamente basse, sono necessarie solo tracce di monossido di carbonio, difatti già nella parte superiore del forno la reazione è tutta spostata verso destra. Nella figura seguente si riportano le curve di equilibrio degli ossidi di ferro, cui viene aggiunta anche la curva di Boudouard, evidenziata in rosso, che rappresenta la curva di dissociazione del monossido di carbonio

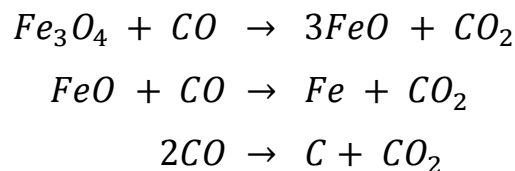


Gli equilibri rappresentati dipendono solo dalla temperatura e non dalla pressione perché non si hanno significative variazioni di volume, pertanto per sapere se una trasformazione avverrà o meno, per ogni valore di temperatura, è sufficiente fornire il dato relativo alla composizione dell'atmosfera in equilibrio col metallo e il suo ossido, che solitamente viene espresso in $\left[\frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2} * 100 \right]$. Le linee quindi rappresentano l'insieme dei punti in cui si ha la coesistenza in equilibrio del metallo e del suo ossido, lo spazio viene quindi diviso in due porzioni: a sinistra della linea esiste solamente l'ossido, mentre a destra solo il metallo.

Da quanto detto si può dedurre che è molto vantaggioso avere la linea dell'ossido di interesse il più possibile spostata verso sinistra, in quanto saranno

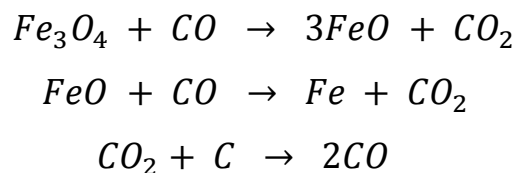
sufficienti quantità molto esigue di CO per portare a termine la riduzione, come nel caso appena visto dell'ossido ferrico. Allontanandosi dall'asse delle ordinate è necessaria sempre più CO in atmosfera e di conseguenza si riduce il campo di esistenza del metallo, fino ad arrivare alla situazione in cui la riduzione con CO diviene impossibile, come nel caso dell'ossido di manganese (MnO), la cui linea è indicata in verde.

Tornando alla produzione di ghisa con altoforno è necessario dire che per avere la riduzione degli ossidi a ferro è necessaria un'atmosfera ricca di CO. Le reazioni che avvengono, come detto, sono funzione della temperatura cui ci si trova, e sono le seguenti: alle basse temperature, tipiche della parte alta del forno, si ha la riduzione indiretta, reazione esotermica ad opera esclusivamente del CO:

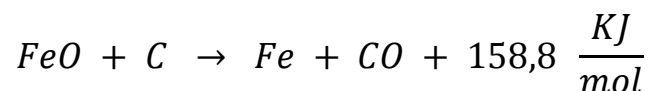


l'ultimo passo fa capire come durante questa fase, tipica della zona 2, vi sia deposito di carbonio, utile nella seguente riduzione del materiale.

Entrando più nel vivo della lavorazione si hanno temperature maggiori, per cui è tipica la cosiddetta riduzione diretta, che assorbe molto calore e si espleta secondo i seguenti passaggi:



Dalle ultime due reazioni si evince l'importanza del carbonio dissociato in precedenza, che porta alla seguente reazione esotermica:



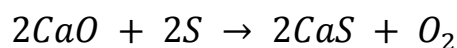
Il prodotto finale è quindi una ghisa che solitamente ha un contenuto di carbonio intorno al 3,5 – 4 %, mentre silicio e manganese si attestano tra lo 0,6 e l'1,6%, pertanto si ha un metallo grezzo per il quale è necessaria un'ulteriore lavorazione di purificazione. Questa viene operata attraverso convertitore, cui il materiale giunge attraverso appositi carri di capacità di circa 150t.

4.5. Desolfurazione

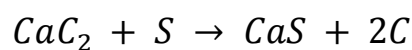
Prima di approdare al convertitore per essere ulteriormente affinato il materiale subisce un trattamento atto a ridurre il contenuto di zolfo, ma anche di silicio e fosforo, tutti elementi pericolosi per le caratteristiche fisiche e meccaniche finali del materiale.

Un'operazione che viene impiegata generalmente è la cosiddetta HMD, dall'inglese Hot Metal Desulphurization, questa generalmente viene condotta durante il trasporto del materiale dall'altoforno al convertitore. Il metodo su si basa è il seguente: viene calato nel metallo fuso un numero di lance pari al numero di elementi da iniettare nel bagno, che insufflano un reagente permettendone un ottimo miscuglio al resto del bagno. I reagenti sono basici, la loro composizione è funzione del tenore finale di zolfo che si vuole ottenere e permettono di raggiungere valori pari anche allo 0,001% di zolfo. Gli agenti desolforanti maggiormente utilizzati sono:

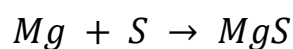
- calce: è molto utilizzata perché economica e facile da reperire, tuttavia è necessario che le dimensioni dei suoi grani siano minori di 45 micrometri, perché altrimenti tende a essere circondata da solfato di calcio (CaS) e silicato di calcio (CaSiO₄), che ne inibiscono la reattività. La tipica reazione di desolfurazione che avviene è:



- carbonato di calcio: una volta era l'agente maggiormente utilizzato, tuttavia oggi viene utilizzato meno a causa delle condizioni ambientali particolari in cui può essere utilizzato e delle complicate modalità con cui è necessario movimentarlo. In questo caso la reazione che si espleta è:



- magnesio: questo elemento ha grande affinità sia con l'ossigeno, sia con i solfuri, difatti quando viene insufflato nel bagno non è accompagnato da ossigeno, in modo che possa rapidamente formare solfato di magnesio attraverso la seguente reazione:



questo composto tende a formare una scoria galleggiante, che viene successivamente rimossa. Il magnesio è costoso rispetto agli altri agenti

desolforanti, tuttavia è venti volte più efficace del calcio per questa applicazione

Infine va detto che questa operazione comporta un'elevata perdita di calore, che può abbassare la temperatura del bagno anche di 30 °C, va completata in tempi il più ristretti possibile per non danneggiare il materiale refrattario di cui è composta la siviera e infine è molto importante che i fumi prodotti vengano raccolti e bonificati in appositi impianti, perché pericolosi se dispersi in ambiente.

4.6. La conversione del metallo

Il trattamento di prima fusione ha permesso di ottenere ghisa attraverso l'utilizzo dell'altoforno. La lavorazione finalizzata all'ottenimento di acciaio prosegue con l'utilizzo di un convertitore, grazie al quale è possibile ridurre il contenuto di carbonio e delle impurezze indesiderate entro limiti accettabili. La conversione del metallo grezzo è quindi quell'operazione volta a eliminare una certa quantità di uno o più elementi e può essere molto diversa a seconda di ciò che si deve trattare. Tuttavia vi sono degli aspetti che accomunano tutti i processi: per prima cosa si può dire che tutti i processi utilizzano dei gas ossidanti per eliminare gli elementi indesiderati, tale gas nei primi impianti realizzati era aria, ma a partire da metà '900 si è iniziato a utilizzare ossigeno industrialmente puro in modo da ottenere sensibili abbattimenti del tenore di azoto; un altro punto comune a tutti i procedimenti è che non viene fornito calore dall'esterno durante la conversione, quindi non viene utilizzato alcun tipo di combustibile, bensì viene sfruttato il calore prodotto dalle reazioni di ossidazione di elementi termogeni come silicio o fosforo, che essendo fortemente esotermiche permettono il raggiungimento delle temperature necessarie al completamento dell'operazione.

La loro struttura è composta da un recipiente di forma pressoché romboidale, col lato lungo posto in verticale, che può essere girato attorno al suo asse orizzontale per consentire le operazioni di carico e scarico attraverso dei portelli laterali. Sono realizzati in materiale refrattario, generalmente rivestiti in lamiera e uno degli aspetti che li differenzia è la posizione da cui viene insufflato l'ossigeno nel bagno fuso, che può essere: dal fondo, lateralmente oppure dall'alto grazie a una lancia munita di ugello da cui esce il gas.

Esistono diversi tipi di convertitori come ad esempio il Bessemer, il Thomas, i forni ad arco e l'L.D., abbreviazione di Linz–Donawitz, che sono le città tedesche in cui è nata questa tecnologia.

Per quanto concerne i primi si può affermare che hanno un'importanza prevalentemente storica, difatti non vengono più utilizzati perché forniscono materiali di scarsa qualità a fronte di costi e tempi elevati. Questo è diretta conseguenza del fatto che operano un'ossidazione attraverso l'utilizzo di aria e non di ossigeno industrialmente puro.

Il forno Thomas invece prende il nome da Sidney Thomas, che lo elaborò per poter trattare al meglio le ghise ad alto contenuto di fosfati tipiche della sua regione, la Lorena. La carica veniva realizzata con ghisa liquida avente determinate caratteristiche, calce e rottami e come già detto non necessitava di combustibile. Il recipiente da cui era composto questo convertitore era rivestito di dolomite, ciò gli permetteva di resistere a dovere alle alte temperature e di partecipare attivamente al processo di trasformazione. Sul fondo del recipiente erano posizionati degli ugelli da cui si insufflava aria nel bagno, in modo che avvenissero le reazioni di ossidazione, che innalzando la temperatura facevano passare gli elementi indesiderati nelle scorie o in atmosfera eliminandoli dal bagno. Le scorie venivano poi rimosse inclinando opportunamente il convertitore ed erano utilizzate come fertilizzante perché ricche di fosfati. Successivamente si aggiungevano elementi per raggiungere la composizione chimica voluta e infine si colava nella siviera. Questo metodo permetteva di produrre un massimo 30 tonnellate di acciaio alla volta.

I convertitori L.D. e i forni elettrici ad arco sono i discendenti dei Bessemer e Thomas e rappresentano le tecnologie maggiormente utilizzate ai giorni nostri, soprattutto il primo, che oltre al nome LD è famoso anche come processo BOS, dall'inglese Basic Oxygen Steelmaking, ed è utilizzato per produrre più del 60% dell'acciaio prodotto nel mondo. L'impianto è molto più grande del volume di materiale da trattare in modo da limitare al minimo le proiezioni esterne di metallo, è rivestito di materiale refrattario basico, generalmente dolomite e magnesite, ed è basato sull'utilizzo di ossigeno puro al 99% come agente ossidante, che ha permesso di abbattere i tenori di azoto all'interno dell'acciaio fino a valori anche minori allo 0,03%. L'insufflazione nel bagno liquido avviene attraverso una lancia raffreddata ad acqua, che viene calata verticalmente dal foro presente in cima alla struttura. La loro produttività è di circa 300 t/h, grazie a un ciclo produttivo di 45 minuti circa, molto più breve di quello caratteristico dei convertitori visti in precedenza, il cui ciclo si aggirava intorno alle 10–12 ore. Il funzionamento vero e proprio avviene attraverso l'avvicinarsi dei seguenti passaggi:

- il materiale proveniente dall'altoforno e temporaneamente alloggiato in un contenitore di materiale refrattario chiamato siviera, viene mandato al BOS. A volte si rendono necessari dei pretrattamenti finalizzati a ridurre i contenuti di zolfo, silicio e fosforo come enunciato in precedenza

- la carica è composta per il 75–80% di ghisa e per la restante percentuale di rottami d'acciaio e deve avere una composizione chimica controllata con cura, in quanto non essendoci combustibile è fondamentale che la sua composizione dia luogo alle reazioni necessarie ad alzare sufficientemente la temperatura, condizione necessaria al completamento della lavorazione. Una volta caricato il convertitore viene portato in posizione verticale e la lancia di insufflazione viene calata al suo interno, dove emette ossigeno ad altissima pressione, inoltre vengono aggiunti calce e magnesio, che agevolano la produzione di scorie liquide basiche. Così facendo la temperatura sale fino a sfiorare anche i 2000 °C e si ha una forte decarburazione, causata dall'elevata produzione di CO e CO₂, che permette di raggiungere tenori di carbonio anche inferiori allo 0,1%. L'alta temperatura fonde i rottami e combinata con l'azione dell'ossigeno, aiuta a rimuovere tutti gli elementi indesiderati. Questo ha favorito l'adozione dell'ossigeno appunto, perché operando con aria, che è ricca di elementi non reagenti come l'azoto ad esempio, non si raggiungono gli stessi risultati
- a questo punto si effettuano prima dei controlli sulla composizione chimica del materiale. Se questo è soddisfacente si può di procedere con la colata del metallo, realizzata grazie a un foro posto vicino alla sommità e che sancisce la fine della lavorazione

L'altro metodo che ha riscosso successo impiega il forno elettrico ad arco, conosciuto nel mondo come EAF, dall'inglese Electric Arc Furnace. In questo caso la forma è cilindrica, costituita da metallo internamente rivestito di refrattario, con la parte inferiore in materiale isolante. Superiormente ha una volta rimovibile, anch'essa in refrattario siliceo e da cui si caricano i rottami; posteriormente si trova uno sportello da cui si rimuovono le scorie o si aggiungono additivi, anteriormente invece c'è la bocca da cui si effettua la colata, realizzata anche grazie a un pistone oleodinamico, che permette di inclinare la culla di ribaltamento su cui è poggiato il tutto. La bocca è posizionata in basso, in modo che durante la colata le scorie non si riversino nella siviera, così facendo è possibile risparmiare materiale refrattario, inoltre l'operazione avviene più velocemente e con minore dispersione di calore.

La carica è realizzata introducendo rottami dalla volta, che vengono preriscaldati dai gas raccolti all'uscita del forno per una migliore efficienza energetica, mentre l'apporto di ghisa e calcare avviene attraverso la bocca

posteriore. Una volta finita questa operazione si calano dall'alto tre elettrodi in grafite disposti a triangolo equilatero, di diametro variabile dai 100 ai 600 mm, che vengono mantenuti a una distanza costante dal bagno in modo da creare archi voltaici che portano a fusione la carica, facendole raggiungere una temperatura intorno ai 1600 °C, grazie alla quale avvengono le reazioni chimiche volute. Finita la lavorazione il materiale viene colato in una siviera, da cui poi proseguirà il suo ciclo di produttivo. Uno svantaggio rispetto al convertitore LD è che la produttività di questi forni normalmente non supera le 100 t/h.

L'operazione di conversione è fondamentale ottenere la composizione chimica voluta, tuttavia spesso non è sufficiente ad ottenere un prodotto adatto alla lavorazione industriale, pertanto si rendono necessari ulteriori trattamenti atti ad affinare maggiormente il prodotto.

4.7. Raffinazione

La raffinazione è l'operazione attraverso cui il materiale proveniente dalla conversione viene definitivamente reso adatto alla lavorazione finale, tale passaggio potrebbe essere espletato anche nei convertitori, tuttavia sarebbero richiesti particolari accorgimenti e tempi molto maggiori rispetto a quelli enunciati in precedenza, che implicano l'immobilizzazione dei forni, motivo per cui si preferisce separare le lavorazioni, che così possono anche essere condotte più efficacemente. Fondamentalmente consiste nell'eliminazione degli elementi nocivi presenti nel bagno, aspetto molto importante in un mercato sempre più esigente nei confronti della qualità del prodotto finale.

Esistono diverse tecniche per portare a termine questa operazione, ognuna delle quali ha un suo campo principale di applicazione. La più interessante è sicuramente l'affinazione, processo termico tipico della fabbricazione dell'acciaio che mira all'abbattimento delle concentrazioni di: azoto, idrogeno, ossigeno e composti di carbonio. Essa viene realizzata all'interno della siviera, attraverso due tipi di impianti:

- degassatori, di cui l'RH e il DH sono un esempio, che permettono la disossidazione, la deidrogenazione e la decarburazione dell'acciaio liquido. In entrambi viene posizionata sopra la siviera una camera vuota, dalla quale vengono calati nel bagno fuso uno o due tubi, che iniettano argon nel bagno mescolandolo e rendendo efficiente e veloce l'operazione. Il risultato è una reazione tra carbonio e ossigeno a formare monossido di carbonio, che diminuisce il tenore nel bagno di entrambi.
- il CAS/OB persegue l'abbattimento della concentrazione di solfuri attraverso l'iniezione dal basso di argon nel bagno metallico, che creando turbolenza nel liquido ne permette il continuo miscuglio con rottami di composizione controllata, grazie ai quali avviene la desolforazione. L'atmosfera all'interno della siviera è inerte, pertanto permette anche l'aggiunta di elementi leganti per affinare la composizione chimica, tanto che la si copre superiormente in modo che l'acciaio non subisca una riossidazione venendo a contatto con l'aria. Tra una lavorazione e la successiva possono esserci forti variazioni di temperatura, per questo motivo le siviere devono essere preriscaldate

4.8. Colata

Dopo che il materiale è pronto per essere lavorato viene colato in dei grossi secchi, chiamati siviere, questa operazione è di fondamentale importanza in quanto se non fatta con attenzione può compromettere tutta la preparazione del materiale appena vista, perché può portare all'ossidazione e alla comparsa di inclusioni esogene, entrambe particolarmente dannose per il prodotto finale a questo punto del ciclo produttivo. Tuttavia se condotta a dovere questa operazione può portare a un'ulteriore pulizia del materiale.

Con il progresso tecnologico sono andati istituendosi due tipi di cicli lavorativi: quello più antico viene chiamato colata tradizionale ed è in corso di superamento dal metodo più moderno, che prende il nome di colata continua e permette di trasformare il materiale colato direttamente in un semilavorato attraverso un unico passaggio.

La colata continua ha preso piede a partire dagli anni '70 e oggi è utilizzata in più del 80% della produzione di acciaio nel mondo. Questo processo permette di far solidificare direttamente il materiale in blumi, che sono delle forme da cui si ricava il profilo della rotaia, nel caso della Lucchini Spa la sezione può essere quadrata, con lato 320 mm, oppure rettangolare di dimensioni 340x245 mm. I vantaggi ottenuti con questo metodo principalmente sono: semplificazione impiantistica grazie all'eliminazione principalmente di forni a pozzo, laminatoi e sbozzatori e conseguente risparmio energetico, aumento di produttività e flessibilità, miglioramento della resa come diretta conseguenza dell'eliminazione della matterozza e maggiore qualità finale, garantita dalla possibilità di controllare automaticamente tutte le variabili di processo.

I passaggi attraverso cui si espleta sono: in primo luogo la colata dalla siviera alla panierina, che avviene grazie a un foro posizionato sul fondo della siviera, da cui il deflusso del metallo liquido è regolare e controllato. Il materiale finisce poi nelle lingottiere, che non sono più il luogo in cui il metallo solidifica completamente come accadeva in passato, infatti quando il materiale inizia a solidificare il loro fondo mobile viene aperto e il metallo semisolido viene convogliato verso dei rulli, che lo guidano verso la laminazione iniziando a modellarlo, mentre dei getti d'acqua lo raffreddano.

4.9. La laminazione

Il ciclo produttivo che porta al prodotto finito prosegue con la laminazione a caldo, operazione durante la quale il materiale viene fatto passare attraverso una serie di cilindri accoppiati, che progressivamente ne riducono e modellano la sezione, fino a farle raggiungere la forma e le dimensioni volute. In questa fase è importante mantenere il materiale a una temperatura sufficientemente alta, in modo che i cilindri si usurino lentamente e abbiano quindi una vita utile maggiore, tuttavia va anche considerato che mantenendo le temperature più basse si migliorerebbero le caratteristiche del materiale.

Come nel resto dell'impianto anche qui il monitoraggio è costante e finalizzato alla garanzia di un'elevata qualità del prodotto finale. Delle telecamere ad alta definizione insieme a delle sorgenti laser controllano: le dimensioni del profilo, la temperatura del prodotto, la velocità di laminazione, l'efficienza di tutte le attrezzature e infine la presenza di difetti superficiali di qualunque tipo.

La laminazione a caldo si distingue da quella a freddo perché non è accompagnata da incrudimento e affinamento del grano tipiche invece della laminazione a freddo, questo a causa di un processo di ricristallizzazione, che alle alte temperature si innesca spontaneamente rigenerando il grano. Questo processo è analogo a quello che avviene durante la ricottura grazie alla successione di tre fasi:

- la prima è denominata recovery ed è caratterizzata da una riorganizzazione delle dislocazioni presenti nel reticolo, che porta a una riduzione della loro energia interna
- la seconda fase è la ricristallizzazione, questa consiste nella nucleazione di nuovi grani a partire dai bordi di quelli vecchi. La crescita continua finché i nuovi grani non vengono in reciproco contatto e ciò sancisce la completa scomparsa della vecchia struttura. La grandezza dei nuovi grani è funzione della temperatura cui avviene il trattamento, che pertanto deve essere accuratamente controllata
- la terza fase è l'accrescimento del grano, che è funzione non solo della temperatura, ma anche del tempo per cui questa viene mantenuta, che maggiore è e maggiori sono le dimensioni del grano. Il risultato finale è una nuova struttura priva di tensioni interne

Tuttavia rimane traccia dell'orientamento subito durante la lavorazione, motivo per cui le inclusioni possono essere particolarmente pericolose.

Finita la laminazione a caldo il ciclo prosegue con la marchiatura e successivamente il raffreddamento delle rotaie.

4.10. Marchiatura

Per garantire la tracciabilità di tutte le rotaie e favorire indagini di qualunque tipo se necessarie, ogni singola rotaia prodotta viene marchiata con una serie di informazioni che la identificano univocamente. La marchiatura viene realizzata automaticamente da due marcatrici a caldo mentre procede sulla via a rulli, quindi senza interrompere il ciclo di lavorazione. Le specifiche riportano che deve essere realizzata in rilievo da un unico lato al centro dell'anima e deve essere chiaramente leggibile e ripetuta almeno ogni 4 m, con caratteri alti tra i 20 e i 25 mm e uscenti dal piano dell'anima di un valore compreso tra 0,6 e 1,3 mm.

Sulla rotaia vengono riportati anche il tipo di acciaio di cui è composto la rotaia, che viene indicato attraverso la combinazione di una o più linee, che possono essere di due tipi: corta, di misura 25 mm, oppure lunga, di misura 50 mm. Si riportano nella seguente tabella le diverse linee di marchiatura:

Tipo di acciaio	Linee di marchiatura
R 200	nessun segno
R 220	_____
R 260	_____ _____
R 260 Mn	_____ _____
R 320 Cr	_____ _____ _____
R 350 HT	_____ _____ _____
R 350 LHT	_____ _____ _____

Il marchio definitivo, oltre a quanto appena visto, deve contenere anche le seguenti informazioni: nome identificativo dello stabilimento di produzione, le ultime due cifre dell'anno di fabbricazione del pezzo e il nome associato al tipo di profilo della rotaia. Si riporta un esempio di marchiatura completa a scopo dimostrativo:

nome stabilimento _____ 96 60 E1

questa identificazione indica un profilo di rotaia 60 E1, fatto di acciaio R260 e prodotto nel 1996 dallo stabilimento “nome stabilimento”.

Oltre a questa marchiatura la rotaia deve anche essere identificata da un codice composto da un numero e/o una lettera, tale identificazione va stampata a caldo ogni 5m con apposito macchinario sul gambo della rotaia dalla parte che non è ancora stata marchiata. Anche in questo caso la scritta deve essere chiaramente leggibile, pertanto la normativa riporta anche i caratteri standard che devono essere utilizzati per la scrittura, i quali devono essere inclinati di 10° rispetto alla verticale, alti 16 mm e profondi da 0,5 a 1,5 mm. Le informazioni che devono essere riportate sono: il numero di colata da cui provengono, il numero del lingotto e la sua posizione all'interno della colata e la posizione della rotaia all'interno del blumo, che viene indicato con una lettera, da A a Y, in cui A indica la posizione in testa al lingotto.

Qualora dei segni identificativi mancassero o risultassero alterati devono essere rifatti.

La marchiatura a freddo invece non viene utilizzata generalmente, a meno di specifica richiesta dell'acquirente, in quel caso essa viene applicata esattamente al centro del fungo sulla sua sezione trasversale.

Un altro tipo di marchiatura che va riportata sulla rotaia è un segno verde in caso questa sia di classe di rettilineità “A”, la posizione in cui riportare tale marchio è a discrezione dell'acquirente, che deve specificarla al momento dell'ordine.

4.11. Trattamenti termici

I trattamenti termici sono dei processi di lavorazione eseguiti sui materiali per fargli assumere delle strutture volute e caratteristiche meccaniche di interesse. Nel caso delle rotaie si utilizzano sia le velocità di raffreddamento per ottenere le microstrutture viste in precedenza, oppure vengono scaldate a temperature maggiori di A_3 , in modo da ottenere una riaustenizzazione del materiale, che attraverso opportuni accorgimenti permette di ottenere le proprietà ricercate. Nel seguito si enunciano quelli che sono i trattamenti termici di maggiore interesse ai fini applicativi.

4.11.1. La tempra dell'acciaio

In corrispondenza dei giunti di dilatazione le rotaie sono soggette a colpi ripetuti dati dagli assi dei treni in transito, si rende necessaria quindi un'operazione volta al miglioramento delle caratteristiche meccaniche delle testate, in modo che anche questa parte di rotaia abbia la stessa vita utile delle restanti. Il trattamento utilizzato solitamente è la cosiddetta tempra superficiale, che interessa circa 7 cm di ciascuna rotaia trattata, per uno spessore di circa 3 – 4 mm.

Il procedimento attraverso cui si concretizza questa operazione inizia con il portare le due teste a una temperatura di circa 50 °C sopra il valore A_3 , che va mantenuta per un tempo sufficiente a trasformare la struttura del pezzo in austenitica. Utilizzando un sistema di riscaldamento elettrico si può ottenere un risultato soddisfacente già dopo circa un minuto, ovvero un riscaldamento superficiale con il nucleo della rotaia rimasto freddo, che viene ottenuto utilizzando grandi potenze specifiche per brevi tempi di applicazione. A quanto detto segue un brusco raffreddamento, con velocità maggiore di V_s , grazie al quale il materiale assume la struttura martensitica voluta, caratterizzata da elevata fragilità, ma anche da grande durezza e resistenza. Il raffreddamento solitamente viene realizzato immergendo il pezzo in un mezzo temprante, che generalmente è acqua o olio, la scelta va operata in funzione dell'attitudine alla tempra del materiale, che è condizionata in primo luogo dalla penetrazione della tempra, che è funzione di tre componenti: sua composizione chimica, il mezzo temprante e il rapporto superficie – volume.

La penetrazione è molto importante in quanto può far variare molto le caratteristiche meccaniche, inoltre è bene ricordare che può indurre nel materiale tensioni interne rilevanti, che possono comportare deformazioni e rotture. Questo fenomeno è dovuto al fatto che la trasformazione da austenite a martensite avviene con un aumento di volume e dato che la parte più esterna si raffredda prima, essa è la prima a raggiungere la temperatura M_s . Successivamente anche il cuore del pezzo raggiunge la suddetta temperatura, pertanto vorrà anch'esso aumentare il proprio volume, cosa impedita dall'esterno già trasformato con conseguente instaurazione di tensioni interne.

4.11.2. Ricottura

Questo trattamento si svolge attraverso le seguenti fasi:

- riscaldamento fino a una temperatura superiore ad A_3 di circa cinquanta gradi, in modo da ottenere una struttura composta da ferro γ
- mantenimento di tale temperatura per un tempo sufficiente ad assicurare che la struttura sia completamente austenitica
- raffreddamento lento finalizzato all'ottenimento di una microstruttura costituita da ferrite e perlite

il risultato finale è un annullamento delle eterogeneità strutturali, ma anche di incrudimenti e stati di coazione che possono essere dovuti alle lavorazioni subite ad esempio. Tuttavia la sua esecuzione è poco economica perché necessita il raggiungimento di alte temperature, richiede una notevole immobilizzazione di mezzi e tempo e la struttura ottenuta risulta a grani grossi.

Per questi motivi ha preso piede quella che viene definita la "ricottura isoterma", che è frutto dello studio delle curve di raffreddamento ed è caratterizzata da un riscaldamento iniziale superiore ad A_3 e da un successivo mantenimento a temperature inferiori ad essa. Quindi si ha un raffreddamento espletato in due fasi successive, che permette l'abbassamento di costi e tempi necessari, a fronte di un risultato finale equivalente.

4.11.3. Normalizzazione

Questa operazione solitamente viene accompagnata da una seconda, come ad esempio la ricottura di addolcimento, perché dà prodotti finali che possono essere eccessivamente duri. Le fasi che permettono di realizzare questo trattamento sono: un riscaldamento iniziale fino a una temperatura di circa 70 °C superiore ad A_3 , mantenimento ad alta temperatura in modo da ottenere una struttura completamente austenitica e infine un raffreddamento in aria a temperatura controllata, cosa che costituisce un vantaggio rispetto al sistema precedente perché non è necessario immobilizzare altri forni. La struttura ottenuta in questo modo presenta un grano molto regolare e fine, che porta con sé un notevole innalzamento dei carichi di snervamento e rottura rispetto a quelli ottenuti con la ricottura.

4.12. Taglio, raffreddamento e raddrizzatura

Dopo la laminazione e la marchiatura le rotaie vengono prima tagliate in spezzoni lunghi poco più di 108 m, poi posizionate su una placca di raffreddamento lunga circa 120 m, attraverso l'utilizzo di appositi carrelli che ne permettono una corretta e indipendente movimentazione.

Durante il loro raffreddamento le rotaie sono soggette a incurvamento, questo è dovuto al profilo asimmetrico della rotaia, infatti la suola essendo sottile impiega poco tempo a raffreddarsi, mentre il fungo invece rimane caldo più a lungo contraendosi solo in un secondo momento. È importante che questa fase avvenga il più omogeneamente possibile, affinché non vi siano variazioni della velocità di raffreddamento, che potrebbero determinare alterazioni delle caratteristiche tecnico – meccaniche.

Tuttavia, anche utilizzando tutte le precauzioni del caso, la rotaia si incurva, infatti ogni impianto è dotato di una sezione atta alla raddrizzatura. Questa operazione è atta ad eliminare le deformazioni lineari rimaste e viene condotta attraverso l'utilizzo delle cosiddette macchine raddrizzatrici, una ad asse verticale e una ad asse orizzontale, che attraverso dei rulli posti in serie danno la forma alla rotaia e la rendono perfettamente rettilinea.

4.13. Controlli non distruttivi

Al fine di garantire la qualità della superficie e dell'interno della rotaia la normativa impone che ogni pezzo prodotto venga testato con ultrasuoni. Tuttavia per assicurare una maggiore qualità finale si possono prevedere ulteriori controlli, come ad esempio il controllo a correnti indotte.

4.13.1. Correnti indotte

Questi sistemi permettono un controllo in continuo della rotaia, con velocità che possono raggiungere anche 1 m/s, e segnalano automaticamente la presenza e la posizione di qualunque tipo di difetto incontrino.

Il metodo può essere applicato solo a materiali conduttori e il principio su cui si basa è indurre delle correnti all'interno del materiale da testare e monitorandone intensità e percorso. Le correnti generalmente vengono generate attraverso un campo magnetico prodotto da una bobina, il valore di queste influenza l'impedenza del circuito, quindi misurando le variazioni di impedenza si risale alla presenza di difetti. Adattando il metodo all'applicazione in analisi quindi è possibile rilevare imperfezioni sia di tipo geometrico, come deformazioni, variazioni di sezione, cricche e altri, sia di tipo elettrico o magnetico, dunque legati a eterogeneità della composizione chimica, come le inclusioni.

4.13.2. Controllo agli ultrasuoni

Questo controllo è obbligatorio per normativa e deve essere effettuato per tutta la lunghezza della rotaia e in sezioni specifiche, che sono:

- almeno il 70% della testa, conducendo l'esame su entrambe le facce della rotaia e dalla superficie di rotolamento
- almeno il 60% del gambo
- un'area situata nella mezzeria della suola e larga quanto il gambo deve essere ispezionata per rilevare la presenza di imperfezioni.

La strumentazione utilizzata deve consentire di individuare difetti con una tolleranza di $\pm 0,1$ mm e le cui dimensioni minime sono riportate nella seguente tabella:

profondità [mm]	Lunghezza [mm]	Larghezza [mm]
1,0	20	0,5
1,5	10	0,5

La strumentazione deve essere calibrata attraverso l'utilizzo di una rotaia di prova contenente difetti preindividuati in modo da capirne il suo corretto funzionamento, inoltre deve essere automatica, consentire un rilevamento continuo dei risultati ed avere almeno un livello di sensibilità maggiore di 4 dB rispetto a quello necessario a individuare qualunque difetto presente nei provini di calibro.

I difetti riscontrati vengono segnalati in tempo reale al personale tecnico, sia su dei monitor coordinati con la strumentazione, sia in rapporti di ispezione redatti automaticamente. Inoltre un piccolo spruzzo di vernice ne individua la posizione per facilitare il successivo controllo, che deve essere effettuato utilizzando uno strumento con 2 dB in più di sensibilità rispetto al precedente e se risulta ancora la presenza di difetti si hanno due possibilità: o si rifiuta la rotaia, oppure si procede al taglio della parte danneggiata.

Gli ultrasuoni sono uno strumento molto utilizzato anche per il monitoraggio dell'armamento in esercizio, sia per individuare e monitorare il progresso di difetti originati in superficie, sia per verificare che dall'interno della rotaia non abbiano origine dei fenomeni la cui crescita potrebbe pregiudicare la sicurezza dell'attività o portare alla sospensione della circolazione con conseguenti perdite economiche. Esistono macchine appositamente concepite per effettuare rilievi in continuo in linea, a velocità anche di 90 km/h e un esempio è l'US6-1 sviluppato dalla Speno Spa. Questo treno bidirezionale possiede delle sonde che mandano segnali ultrasonici ad elevata frequenza alle rotaie con diverse angolature, maggiori sono gli angoli per cui vengono mandati gli impulsi e maggiore è la precisione con cui vengono identificati i difetti, che vengono palesati dalla rottura dei fasci d'onda. Il mezzo è equipaggiato per registrare elettronicamente tutte le informazioni carpite in modo da poter compilare una relazione finale riportante tutti i difetti trovati in linea. Inoltre marchia la base della rotaia spruzzando vernice colorata per segnalare il punto in cui è presente il difetto.

4.14. Criteri geometrici di accettabilità

I controlli appena visti verificano anche l'assenza di imperfezioni geometriche su tutte le superfici della rotaia, pertanto nel seguito si riportano le disposizioni date dalla normativa per quanto concerne i criteri geometrici di accettabilità.

4.14.1. Regolarità superficiale

Qualunque estrusione, marchiatura o sbavatura sulla superficie di rotolamento deve essere eliminata, inoltre sotto la suola, qualora fossero presenti sporgenze andrebbero appianate se a meno di 1 m dall'estremità della rotaia. In caso di impronta invece la normativa EN 10163-1 sancisce che la sua profondità non può eccedere i seguenti valori:

- 0,35 mm sulla superficie di rotolamento
- 0,50 mm sul resto della rotaia

In caso siano previsti più segni ripetuti longitudinalmente i limiti dimensionali dati non possono essere raggiunti per più di due volte e il loro rapporto larghezza–profondità deve essere minimo 3–1. In caso di segni ripetuti sul fungo il loro numero non può essere maggiore di 3 ogni 40 m_{lin}.

Per quanto concerne invece le marchiature a freddo la loro profondità non può essere maggiore di 0,3 mm sul piano di rotolamento e sotto la suola, mentre nel resto della rotaia il limite sale a 0,5 mm. Si noti che è buona norma evitare di apporre qualunque tipo di marchiatura sulla suola, perché può essere via preferenziale di innesco di cricche, che in questa posizione sono particolarmente difficili da individuare.

Se la superficie evidenzia danni microstrutturali come la presenza di martensite o inclusioni, queste devono essere levigate, altrimenti si effettua una prova di durezza di Brinell sulla zona lavorata e se il valore ottenuto risulta maggiore di 50 HBW rispetto all'acciaio che la circonda, la rotaia deve essere rifiutata. La zona levigata ha anche dei vincoli dimensionali per quanto concerne la sua profondità, che non può eccedere i valori già visti sopra. Inoltre tali lavorazioni non possono ripetersi più di una volta ogni 10 m.

4.14.2. Tolleranze dimensionali

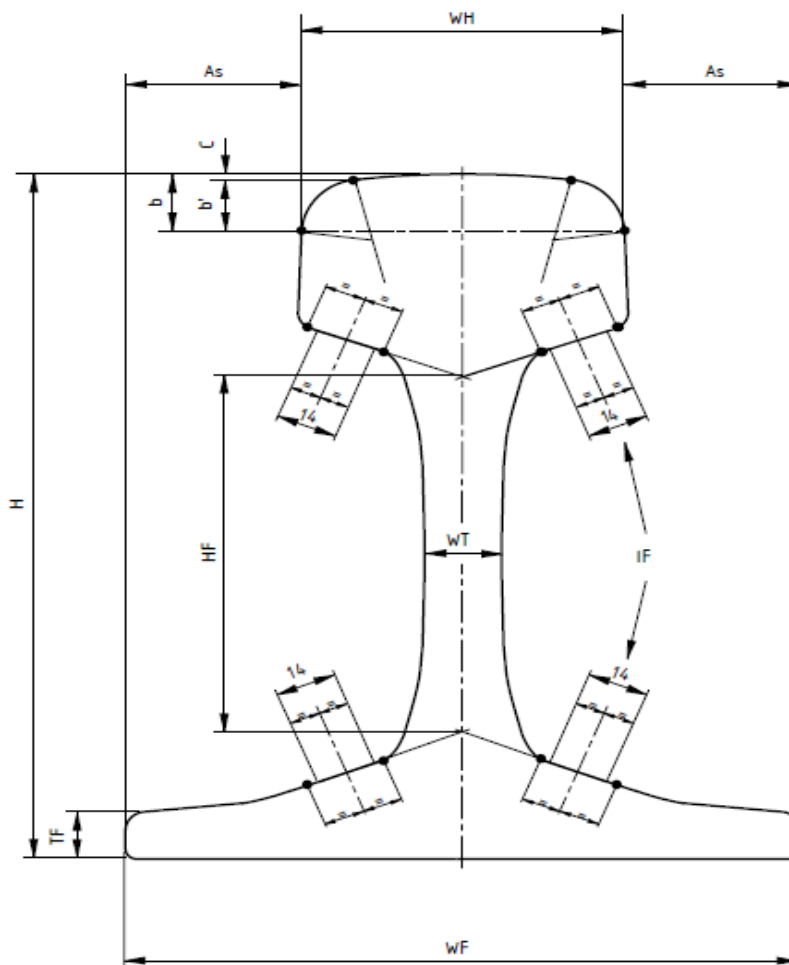
A partire dai vecchi profili sono stati disegnati e accuratamente dimensionati i nuovi profili, che sono 21 in totale. Questi sono assoggettati a stringenti criteri dimensionali, che vedono come massime tolleranze i valori riportati nella seguente tabella:

Punti di riferimento	Classe del profilo [dimensioni in mm]	
	X	Y
Altezza rotaia (H) ^a < 165	±0,5	+0,5 -1,0
	±0,6	+0,6 -1,1
Profilo della corona(C): rettilineità classe A rettilineità classe B	+0,6	+0,6
	-0,3	-0,3
	±0,6	±0,6
Larghezza della testa (WH)	±0,5	+0,6 -0,5
Asimmetria delle rotaie (As)	±1,2	±1,2
Inclinazione delle superfici d'appoggio (IF) (sulla base di 14mm paralleli alla teorica superficie d'appoggio inclinata)	±0,35	±0,35
Altezza piano d'appoggio (HF) <165	±0,5	±0,5
	±0,6	±0,6
≥165		

Spessore dell'anima (WT)	+1,0 -0,5	+1,0 -0,5
Larghezza della suola (WF)	$\pm 1,0$	+1,5 -1,0
Spessore della suola (TF)	+0,75 -0,5	+0,75 -0,5
Concavità della base	0,3 max	0,3 max

^a la variazione totale dell'altezza per qualunque lunghezza non deve superare 1mm per rotaie < 165, mentre il valore sale a 1,2mm se ≥ 165 .

Si riportano nel seguente disegno le grandezze utilizzate come riferimento nella tabella precedente:



4.15. Taglio e foratura

Infine la rotaia viene tagliata alla misura desiderata, forata con dei trapani e cianfrinata in modo che il foro risulti pulito e piano, questo è molto importante perché spesso è proprio dai fori che parte la maggior parte delle rotture, pertanto eliminando lo spigolo vivo si riduce la probabilità di innesco.

Anche in questo caso la normativa di riferimento riporta i requisiti minimi per quanto concerne il taglio delle rotaie, in relazione alla loro lunghezza e alla loro forma nella parte terminale, le dimensioni e locazione dei fori, i quali vanno anche rifiniti a dovere per evitare inconvenienti durante successive lavorazioni. Tali requisiti sono riportati nella seguente tabella:

Requisiti dimensionali	Tolleranze
<p>Diametro del trapano</p> <p>≤ 30 mm</p> <p>> 30 mm</p> <p>Centraggio e posizionamento orizzontale e verticale dei buchi</p>	<p>± 0,5 mm</p> <p>± 0,7 mm</p> <p>Il posizionamento orizzontale viene verificato attraverso l'utilizzo di un'apposita forma appositamente concepita, che ha anche apposite caviglie fatte per entrare nei buchi, tali caviglie sono più piccole dei buchi in cui devono entrare, rispettivamente: di 1 mm per buchi aventi diametro ≤ 30 mm e 1,4 mm per buchi maggiori di tale dimensione. Per verificare il centramento dei buchi si utilizza un'apposita forma</p>
Squadratura delle estremità	0,6 mm in tutte le direzioni (il caso ideale è taglio perfettamente verticale)
<p>Lunghezza ^a: con entrambe le estremità bucate si hanno due possibilità $l \leq 24$ m</p> <p>oppure</p> <p>$24 < l < 40$ m</p> <p>oppure la rotaia può avere nessuna o un'unica estremità con buchi</p>	<p>± 3 mm</p> <p>± 4 mm</p> <p>± 1 mm/m _{lineare}</p> <p>(massimo ± 30 mm su ogni rotaia)</p>

^a le lunghezze delle rotaie sono misurate a una temperatura di 15 °C, per altre temperature diverse da queste vanno effettuate delle correzioni per tener conto della dilatazione e della contrazione

I mezzi con cui si verifica la conformità alle dimensioni imposte dalla normativa sono delle particolari forme realizzate appositamente per questo tipo di controlli.

Finite queste operazioni la rotaia è pronta per il successivo controllo, ossia quello di rettilineità.

4.16. Controllo rettilineità

Prima che la rotaia venga ammessa al controllo finale se ne controlla la rettilineità, la quale può essere di due classi differenti: A o B, la prima è maggiormente restrittiva, pertanto viene utilizzata in applicazioni di maggiore pregio, come ad esempio le linee AV/AC. Questa operazione viene fatta automaticamente e in continuo grazie a un sistema statico, fornito di telecamere ad alta definizione, che genera automaticamente un report su ciascuna rotaia analizzata. In caso ci siano delle riserve sui risultati ottenuti si può utilizzare una apposita barra per la verifica manuale.

I valori di rettilineità, regolarità superficiale e torcimento non devono eccedere dei limiti di tolleranza stabiliti dalla normativa, che sono riportati nella seguente tabella:

		Classe B		Classe A	
		D	L	D	L
Corpo ^a	Planarità verticale (V)	≤ 0,4 mm	3 m ^c	≤ 0,3 mm	3 m ^c
		≤ 0,3 mm	1 m ^c	≤ 0,2 mm	1 m ^c
	Planarità orizzontale (H)	≤ 0,6 mm	1,5 m	≤ 0,45 mm	1,5 m ^c
Estremità ^a	Fine "E"	1,5 m		2 m	
	Rettilineità verticale	≤ 0,5 mm	1,5 m ^c	≤ 0,4 mm	2 m
		e ≤ 0,2 mm		e ≤ 0,2 mm	
	Rettilineità orizzontale	≤ 0,7 mm	1,5 m	≤ 0,6 mm	2 m
		≤ 0,4 mm	1 m ^d		

Sovrapposizione ^a	Lunghezza	1,5 m		2 m	
	Planarità verticale (V)	≤ 0,4 mm	1,5 m ^c	≤ 0,3 mm	2 m ^c
	Planarità orizzontale (H)	≤ 0,6 mm	1,5 m ^c	≤ 0,6 mm	2 m ^c
Intera rotaia	Freccia	10 mm ^e		10 mm ^e	
	Freccia laterale	Raggi di curvatura R > 1500 m		Raggi di curvatura R > 1500 m	
	Inclinazione	Vedere le figure riportate qui sotto			

^a l'apparecchiatura di misura automatica deve essere in grado di misurare la porzione più grande possibile della rotaia, ma il requisito minimo è almeno il corpo centrale, in quanto se le verifiche su questa porzione risultano soddisfatte i controlli su sovrapposizione e estremità non sono obbligatori

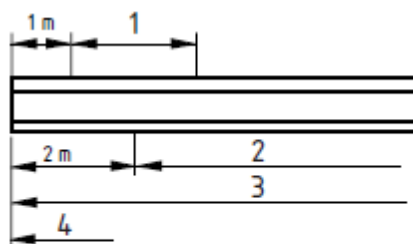
^b la planarità della rotaia deve essere verificabile anche attraverso apposita barra

^c almeno il 95% delle rotaie ispezionate deve risultare conforme ai limiti, mentre per il restante 5% è ammessa un'ulteriore tolleranza di 0,1 mm

^d il riferimento L trasla a E

^e gli estremi delle rotaie non devono trovarsi a un'altezza maggiore di 10 mm rispetto al piano su cui vengono appoggiate durante le ispezioni

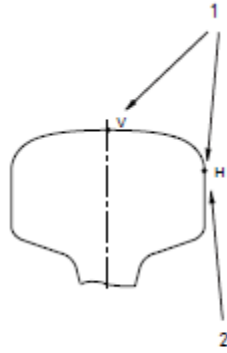
Al fine di comprendere al meglio la tabella appena riportata si possono utilizzare le seguenti figure:



Questa prima figura riporta le posizioni indicate in tabella, che sono le seguenti:

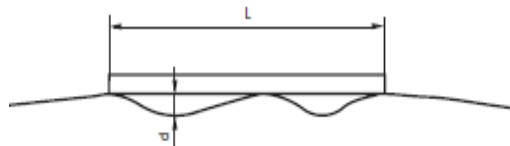
- 1 = sovrapposizione
- 2 = corpo della rotaia
- 3 = rotaia intera
- 4 = estremità della rotaia

La figura seguente invece specifica le posizioni in cui devono essere effettuate le misurazioni riguardanti il corpo della rotaia, che sono state indicate con le lettere V e H come in tabella

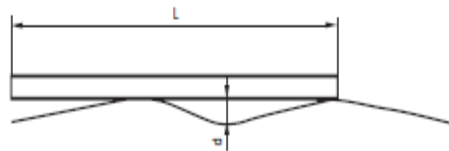
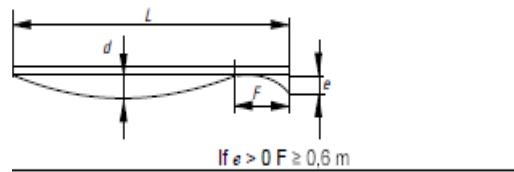


Si riportano anche ulteriori immagini atte a comprendere meglio le grandezze in analisi nella tabella, rispettivamente riferite a:

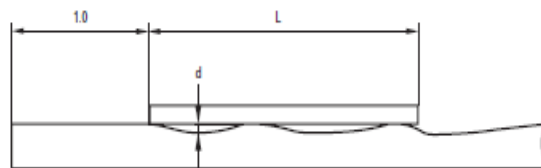
corpo della rotaia



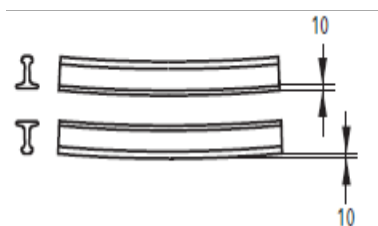
estremità



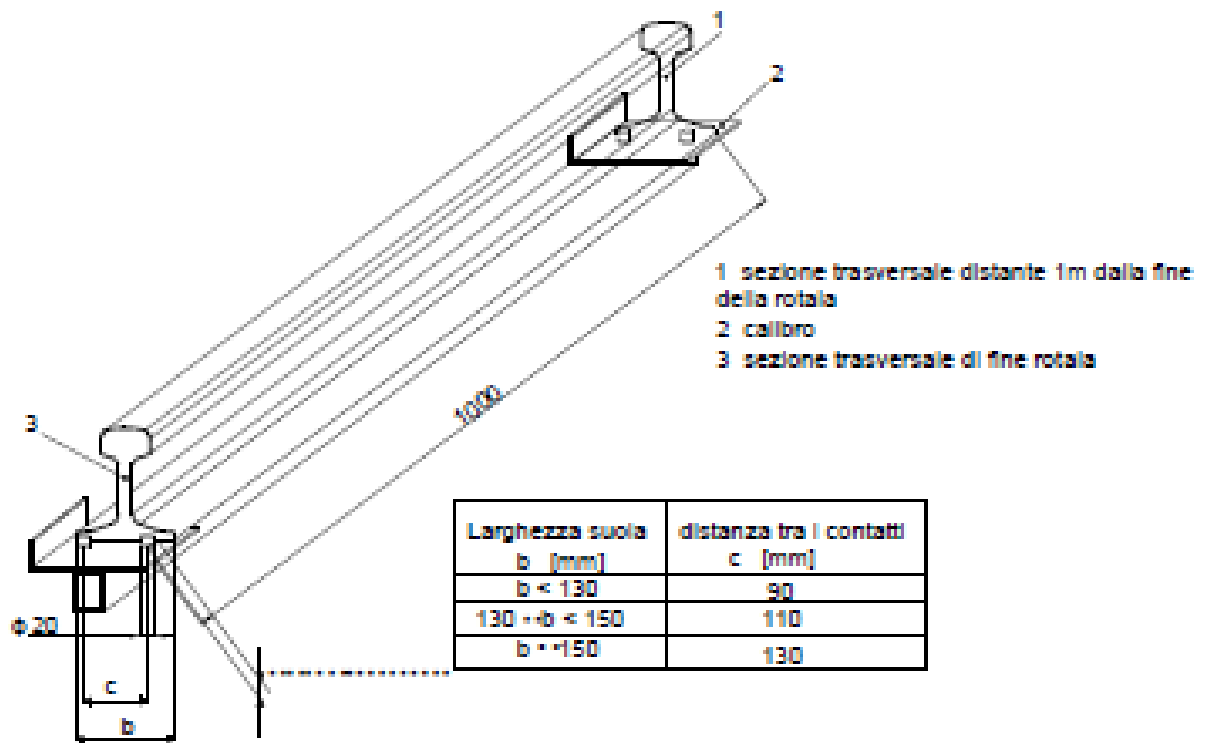
sovrapposizione



intera rotaia



per quanto concerne l'inclinazione della rotaia rispetto al piano orizzontale è necessario fare riferimento ai prossimi due disegni, presi dalla normativa



In caso non vengano rispettati i valori riportati la rotaia può essere assoggettata solamente a un unico passaggio dalla raddrizzatrice, qualora questo non bastasse la rotaia viene rifiutata.

4.17. Collaudo

Il collaudo si svolge in due fasi separate: il collaudo esterno, che indaga sui difetti esterni delle rotaie ed elimina quindi tutte quelle rotaie che per difetti di fabbricazione o forma non sono idonee all'esercizio. Il collaudo qualitativo invece dà un giudizio sulla qualità dell'acciaio prodotto a partire dai risultati delle prove condotte sui provini prelevati. Il materiale che alla fine di queste operazioni risulta essere conforme all'uso viene contrassegnato da un'etichetta adesiva con codice a barre, che permette di registrare una serie di informazioni utili sia per le operazioni successive, sia come identificazione del prodotto. Quelle rifiutate invece vengono divise in due gruppi: quelle da cui si possono ricavare pezzi più piccoli, oppure quelle interamente rifiutate. I pezzi corti verranno utilizzati per applicazioni in deviatori ad esempio, oppure possono essere saldati tra loro per costituire rotaie di lunghezze normali.

Di fondamentale importanza è il mantenimento di un registro che indichi quante più informazioni possibili su tutte le colate, i lingotti e le rotaie, sia per quanto riguarda il materiale accettato, sia per quello rifiutato.

4.17.1. Collaudo esterno

Dopo la verifica della rettilineità le rotaie vengono ispezionate visivamente su dei piani di raccolta muniti di sistemi che movimentano la rotaia girandola su tutte e quattro le sue facce, che vengono ispezionate dagli operatori, che le percorrono per tutta la loro lunghezza, controllando fino a quattro rotaie contemporaneamente. Qualora ci fossero degli ulteriori controlli manuali da effettuare si servono di apposite sagome, grazie alle quali verificano la conformità alle dimensioni riportate in normativa dei seguenti parametri: profilo della rotaia, grandezza posizione e cianfrinatura dei fori, smusso delle testate, piani di steccatura, corrispondenza della matricola segnata sul gambo e in testata. Inoltre va verificata la lunghezza delle rotaie comparandole con campioni di lunghezza definita.

In questa fase si può anche prevedere la pesatura della singola rotaia, che è un'operazione importante ai fini della vendita, infatti l'acciaio viene venduto al chilogrammo.

4.17.2. Collaudo qualitativo

Ognuno dei seguenti test deve essere condotto in un laboratorio di qualità certificata e operante con i sistemi prescritti dalla norma EN ISO 9001, garante della qualità del processo produttivo, quindi del soddisfacimento dei requisiti minimi importanti per ottenere un prodotto finale integro e rispondente a tutte le caratteristiche imposte dalla normativa, da cui deriva la completa sicurezza durante l'esercizio in linea. La conformità alla normativa deve essere costantemente documentata da parte del produttore, perché l'acquirente dei prodotti deve essere sempre in grado di accedere ai risultati e ai dati delle prove. I risultati minimi dei test imposti dalla normativa sono basati sull'analisi di rotaie che hanno operato bene durante la loro vita utile. Qualora il fabbricante non producesse elementi conformi ai requisiti minimi, deve esserci la possibilità di effettuare test di verifica alla prima sequenza utile.

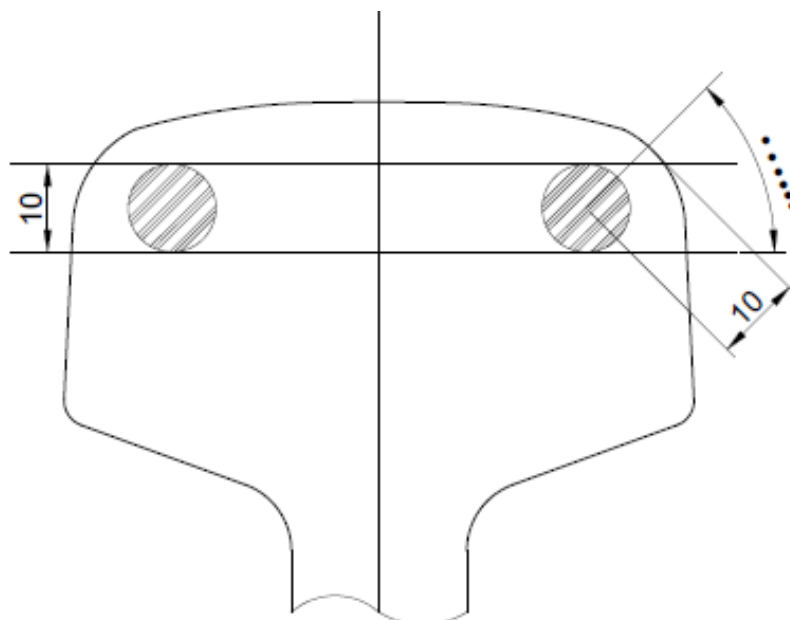
Nel seguito si elencano tutte le prove di laboratorio, tipiche del collaudo qualitativo, cui devono essere assoggettate le rotaie per poter essere dichiarate idonee al servizio in linea:

4.17.2.1. Prova d'urto

La prima prova ad essere effettuata generalmente è quella d'urto, perché per questa prova il provino non necessita di alcuna preparazione. Il provino viene poggiato su due appoggi standard distanti 1,10 metri e viene sollecitato a taglio con una mazza avente peso 1000 kg, che viene lasciata cadere da un'altezza standard funzione del tipo di profilo da testare. I colpi inferti sono due: il primo con il fungo in alto e dopo questo si misura la freccia conseguente al colpo, successivamente si gira la rotaia ponendo in alto la suola e le si dà un secondo colpo, dopo il quale questa non deve risultare né rotta, né lesionata. In caso di esito negativo si riconduce la stessa prova su due provini provenienti da un lingotto diverso dal primo e per aver risultato positivo nessuna delle due prove deve avere esito negativo. In caso contrario tutte le teste delle rotaie A vengono spuntate in modo da scartare un ammontare pari a 300 kg di materiale. Successivamente si riefettua la prova sui provini accorciati, se la prova è ancora negativa si procede a un altro taglio, dopo il quale però se c'è esito negativo si ha il rifiuto della rotaia.

4.17.2.2. Prova di trazione

La prova di trazione invece fa riferimento alla normativa UNI EN 10002-1 e prima che questa venga condotta il provino deve essere mantenuto in forno a 200 °C per 6 ore, in modo da garantirne adeguata preparazione. La posizione da cui si preleva il materiale per la prova è normata e mostrata qui sotto



Il test viene condotto a temperatura ambiente, intorno ai 25 °C circa, grazie a un apposito macchinario avente una parte fissa e una mobile, in mezzo alle quali viene posizionato il provino, avente un'area trasversale minima di 78,5 mm², che viene assicurato agli estremi alle cosiddette teste di afferraggio. La traversa mobile è azionata da un dispositivo idraulico, o in alternativa elettromeccanico, e lavora insieme a un estensometro e a una cella di carico, che insieme permettono di misurare: la forza applicata, lo spostamento della traversa mobile e l'allungamento del provino. Questi dati permettono anche il tracciamento di diagrammi forza – allungamento, da cui si possono dedurre diagrammi sforzi – deformazione. La velocità con cui può essere applicata la forza è normata come riportato nella seguente tabella:

modulo di elasticità del materiale E [MPa]	Velocità del carico unitario [MPa/s]	
	Min	Max
< 150 000	2	20
≥ 150 000	6	60

La scelta della velocità è importante in quanto può introdurre un errore nella stima delle deformazioni, perché i macchinari non hanno rigidità infinita, pertanto deve essere tale da consentire di misurare solamente l'allungamento del provino.

La lunghezza del tratto utile del provino, che viene indicato con L_0 , è proporzionale alla sua sezione secondo la relazione:

$$L_0 = k * \sqrt[2]{S_0}$$

In cui S_0 rappresenta l'area del provino, mentre k è una costante significativa per ricavare dei valori significativi di allungamento e assume un valore pari a 5,65.

La prova porta a rottura il provino e consente di ricavare le seguenti informazioni:

- il limite elastico, da cui si ricava il modulo elastico del materiale E
- il carico unitario di snervamento R_s , che è uno dei parametri più importanti
- il carico di rottura a trazione R_m , i cui valori minimi saranno specificati nel seguito
- l'allungamento A , che viene misurato dopo che la barretta è stata portata a rottura nel seguente modo: prima della prova si segnano due punti distanti 50 mm e a prova finita si accostano i due pezzi rotti e si misura l'allungamento, che deve risultare maggiore di 14 mm.

Per quanto concerne i risultati delle prove, come in molti dei casi precedenti, anche qui vengono differenziati i diversi tipi di acciaio. Per gli acciai non trattati termicamente, che sono: 200, 220, 260, 260 Mn, 320 Cr la resistenza a trazione e l'allungamento devono essere stimati anche attraverso delle equazioni empiriche, che legano la composizione chimica del materiale a questi parametri. Tali equazioni devono essere redatte attraverso una tecnica di analisi a regressione multipla, basata sul susseguirsi di queste operazioni:

- sviluppo di un'equazione predittiva a partire da dati di laboratorio, prendendo in considerazione i risultati di almeno 200 prove
- conferma di tale equazione
- periodico aggiornamento delle equazioni
- azione correttiva qualora fosse necessaria

ogni produttore di acciai deve sviluppare delle proprie equazioni, che devono essere basate su test effettuati alla fine di ogni ciclo di riscaldamento e i loro risultati non devono scostarsi troppo dai risultati delle prove sperimentali, infatti la normativa impone i seguenti limiti massimi di differenza tra i valori provenienti dalle equazioni e dai test di laboratorio:

- resistenza a trazione: ± 25 MPa
- allungamento: ± 2 %

la comparazione dei due risultati va effettuata ogni 2000 tonnellate di materiale prodotto o in alternativa ogni dieci trattamenti termici.

Ovviamente la normativa riporta anche quelli che devono essere i minimi valori risultanti dalle prove in modo da poter garantire con sicurezza che le sollecitazioni date in esercizio non portino a rottura le rotaie. Tali valori sono riassunti nella seguente tabella

Acciai	R_{min} [MPa]
200	680
220	770
260	880
260 Mn	880
320 Cr	1080
350 HT	1175
350 LHT	1175

se la prova di trazione dà esito negativo si procede con la stessa modalità vista per la prova d'urto, tuttavia i provini verranno presi prima dalla parte bassa del lingotto procedendo verso la parte alta.

Qualora i risultati eccedessero i limiti imposti appena visti sarà compito del fabbricante effettuare degli accertamenti in modo da poter correggere gli inconvenienti riscontrati e segnalarli all'acquirente. In caso non si riuscissero a risolvere i problemi riscontrati o l'acquirente risultasse insoddisfatto dai provvedimenti presi il lotto viene respinto.

4.17.2.3. Macrografia

Un altro esame cui si sottopongono le rotaie è la macrografia. Normata dalla ISO 4968, è una prova per cui il provino ha sezione uguale a quella della rotaia da testare e deve essere innanzitutto piattato e limato in modo che presenti una superficie completamente lucida e liscia, successivamente si stende sulla rotaia un foglio di carta fotografica precedentemente immerso in una soluzione di acido solforico, il quale attacca le diverse impurità presenti nel materiale, andando a scurirsi più o meno intensamente in funzione della densità di queste. Ciò che si ottiene quindi è un'indicazione di massima sulla purezza dell'acciaio e il giudizio viene dato comparando il foglio risultante dalla prova con delle macrografie campione, riportate nell'allegato D della norma EN 13674-1. La prova deve essere ripetuta su cinque provini differenti per ogni colata e per dare esito positivo tutti i campioni devono essere classificati come accettabili, altrimenti si procede con un'altra prova sempre con la stessa modalità.

4.17.2.4. Durezza di Brinell

La durezza è la proprietà di un materiale di resistere alla deformazione plastica in conseguenza all'applicazione di uno sforzo, la durezza di Brinell è uno dei tanti parametri attraverso cui si può misurare questa proprietà ed è considerata un parametro di primaria importanza per poter caratterizzare al meglio gli acciai da rotaia. Il suo calcolo è standardizzato, in modo da poter rendere confrontabili diverse misurazioni, e deve essere conforme a quanto prescritto dalla normativa EN ISO 6506-1.

In ferrovia la procedura per la realizzazione della prova è la seguente: come prima cosa è necessario preparare il provino asportandone i primi 0,5 mm di spessore del materiale, successivamente una sfera di carbonato di tungsteno, avente diametro $D = 2,5$ mm, viene premuta con una forza di $F = 1,839$ kN per un tempo pari a 15 secondi sul provino, in modo da lasciare sopra esso un'impronta permanente. Il calcolo analitico dell'indice avviene grazie alla lettura del diametro dell'impronta lasciato sul provino, indicato con d , la cui misurazione avviene attraverso l'utilizzo di un microscopio, che insieme a una piccola pressa e un dinamometro compongono l'apparecchiatura utilizzata per condurre questa prova: il durometro.

L'espressione di calcolo è:

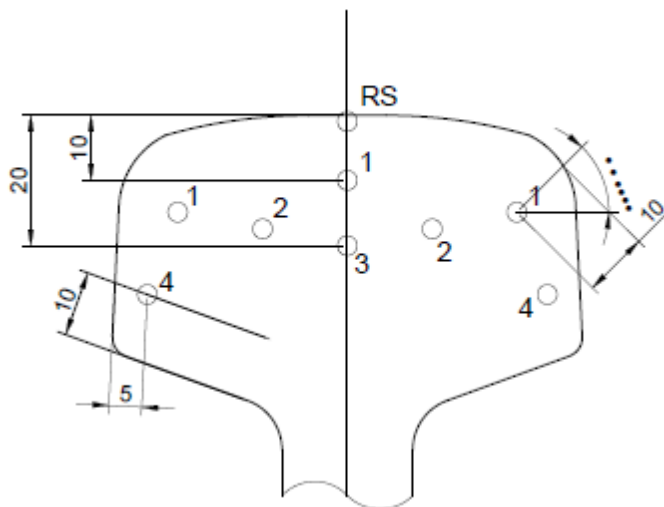
$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \left[\frac{kg}{mm^2} \right]$$

Il valore trovato permette di ricondursi a un valore approssimativo della resistenza a trazione del materiale in questione, che risulta essere circa pari a 0,34 – 0,35 HB.

Affinché la prova sia attendibile la deformazione subita dalla sfera durante la prova deve essere trascurabile in modo da non introdurre errori di misurazione, questo implica il rispetto di condizioni sulla sua durezza rispetto a quella del provino, per questo motivo si ricorre all'utilizzo di sferette in carburi di tungsteno.

Il calcolo della durezza può essere effettuato anche in condizioni diverse da quelle enunciate (in questo caso è sufficiente esplicitarle), oppure è possibile utilizzare altre prove come ad esempio quella di Vickers o Rockwell, tuttavia qualora vi fossero delle dispute di qualunque tipo si dovrà ricorrere a quanto prescritto nella normativa per la durezza di Brinell.

I test vengono effettuati nelle 5 diverse posizioni mostrate in figura



Per ognuna delle posizioni indicate sono richiesti differenti valori di durezza minimi, a seconda anche dei diversi tipi di acciaio in analisi.

Inoltre è possibile fare dei test in tutte le posizioni indicate col numero 1, quando questo sia ritenuto indispensabile, ma i valori risultanti non dovranno differire di più di 30 HBW da quelli previsti per tali posizioni.

I valori minimi delle prove sono normati come nella seguente tabella. Si noti che anche in questo caso vengono differenziati in funzione sia della posizione sul profilo, sia del tipo di acciaio in analisi

Posizione del test	Tipo di acciaio						
	200	220	260	260Mn	320C r	350HT	350LHT
Durezza (HBW)							
RS ^a	200 – 240	220 – 260	260 – 300	260 – 300	320 – 360	350 – 390 ^b	350 – 390 ^b
1						≥ 340	≥ 340
2						≥ 331	≥ 331
3						≥ 321	≥ 321
4						≥ 340	≥ 340

^a RS = punto sulla superficie del fungo

^b se viene passato il valore di 390 HBW, ma non eccede i 405 HBW e viene verificato che la microstruttura è perlitica, allora il test è accettato

I risultati ottenuti con prove effettuate sulla testa del fungo non devono dare valori che abbiano più di 30 HBW di differenza gli uni dagli altri, questo garantisce l'omogeneità nel comportamento della rotaia.

Per quanto riguarda le rotaie trattate termicamente c'è da aggiungere che vanno effettuati dei test aggiuntivi sul tipo di rotaia più lungo prodotto dal fabbricante. I provini vengono realizzati prelevando un metro di rotaia da entrambi gli estremi e a intervalli di 20 metri partendo da uno di questi ultimi, essi, dopo essere stati preparati come visto in precedenza, vanno sottoposti a test di durezza in mezzeria a passo 25 mm e i risultati ottenuti non devono discostarsi più di ± 15 HBW rispetto al valore medio ottenuto.

4.17.2.5. Analisi chimica

Per ogni colata viene effettuata un'analisi chimica, che viene poi fornita al collaudatore, inoltre, per una colata su venti, viene analizzato anche lo spezzone di rotaia con il quale si effettua la prova macrografica e la sua composizione deve rispettare i valori riportati precedentemente in tabella. Il controllo è realizzato sulla parte alta del lingotto perché in questa zona è più facile trovare impurezze, costituite soprattutto da zolfo e fosforo, che salgono in superficie a causa della loro tendenza a segregare, pertanto si indaga la zona in cui il materiale risulta meno puro e quindi con caratteristiche peggiori.

Qualora l'esito della prova sull'analisi chimica non rispettasse i limiti fissati, la colata viene rifiutata e si procede ad effettuare la stessa prova su altre due colate appartenenti alle venti da cui si era presa la prima. Se anche solo una di queste due desse esito negativo si devono esaminare tutte le altre colate e se ne valuta l'accettabilità in base all'esito del test.

Una volta eseguiti tutti i test necessari a qualificare la rotaia e annotati tutti i loro risultati, comprese le eventuali riprove, si emette un giudizio sull'accettabilità o meno dell'intera colata e qualora fosse accettata le rotaie sono pronte al collaudo esterno. In alcuni casi i collaudatori possono decidere di eseguire ulteriori accertamenti prelevando dei campioni. In questa eventualità l'accettabilità è vincolata ai risultati di questi test.

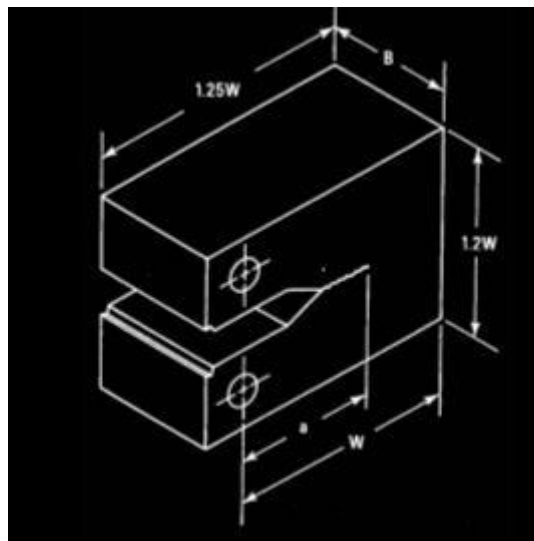
4.17.2.6. Plane strain fracture toughness

Questo test è volto ad individuare la resistenza alla fratturazione di un materiale contenente cricche attraverso il calcolo del fattore di intensità di sollecitazione, generalmente indicato con K_{1c} , in cui i pedici indicano una modalità di rottura del primo tipo, ossia attraverso l'applicazione di uno sforzo elastico-lineare perpendicolare alla superficie di rottura e la cui unità di misura si esprime in $Pa * m^{1/2}$. Di fatto questo indice rappresenta la tendenza di un materiale fratturato a sviluppare un cedimento fragile, perché maggiore è il suo valore e maggiore è la probabilità che la frattura avvenga in modo duttile.

Questo test viene condotto su una barretta a sezione rettangolare, estrapolata dal fungo della rotaia, avente dimensioni che seguono la normativa di riferimento ASTM E399, e sono: 25 mm di altezza, larghezza massima raggiungibile tra 40, 45 o 50 mm e lunghezza tale da consentire l'appoggio della barretta su due tondini distanti quattro volte il valore della larghezza. Prima di

effettuare la prova vera e propria il provino viene prefratturato in un'atmosfera avente temperatura compresa tra i 15 e i 25 °C, con delle sollecitazioni elastico–lineari alternate aventi frequenza compresa tra 15 e 120 Hz in modo che il provino arrivi ad avere delle fratture il cui rapporto lunghezza–larghezza sia compreso tra 0,45 e 0,55, inoltre la porzione deformata plasticamente deve essere piccola rispetto alle dimensioni delle cricche e la propagazione durante l'ultimo 1,25 mm deve essere compresa tra 18 e 22 $Mpa * m^{1/2}$.

La prova si espleta quindi attraverso una flessione su tre punti, utilizzando un provino precedentemente intagliato in mezzeria in modo da indirizzare la propagazione delle cricche.



Per poterla reputare compiuta è necessario effettuare almeno 5 prove per ogni campione a temperature comprese tra i -20 e i 2 °C, che va misurata attraverso l'utilizzo di un termometro saldato al provino. La temperatura è mantenuta bassa perché è proprio alle basse temperature che i materiali hanno comportamenti fragili, ci si pone quindi nelle peggiori condizioni possibili e si individuano i tipi di acciai che è meglio utilizzare in ambienti freddi. Il valore di K_{1c} è calcolato a partire dalla forza applicata, dalle dimensioni del provino e dalle condizioni in cui viene effettuata la prova, che devono riprodurre il più possibile le future condizioni operative del materiale. Il calcolo è formulato nell'ipotesi che il comportamento del materiale sia elastico–lineare e il provino subisca una deformazione piana, motivi per cui quest'ultimo e la prova devono soddisfare requisiti minimi molto stringenti. La relazione che permette la stima del parametro è riportata nel seguito:

$$K_{1c} = Y * \sigma * \sqrt{\pi * a}$$

In cui:

- Y è un parametro dipendente dalla geometria sia delle cricche, sia del provino e da come viene applicato il carico
- σ è il carico applicato
- a è la lunghezza dell'intaglio

Questi parametri sono molto importanti ai fini della significatività dei risultati e vanno sempre esplicitati in modo da poter essere adeguatamente considerate in sede di interpretazione dei risultati, perché maggiori sono le dimensioni e più si riduce l'indice.

La macchina con cui viene effettuato il test deve essere in grado di registrare la forza applicata e la variazione di apertura subita dalle cricche, queste due grandezze sono fondamentali per capire quando si romperà il provino, difatti questo accade solamente quando vengono passati i valori limite o della sollecitazione o della deformazione.

I risultati devono soddisfare dei valori minimi, perché va garantita l'assenza di cedimenti improvvisi, che non essendo prevedibili sono molto pericolosi per la sicurezza dell'esercizio, si fissano quindi i seguenti valori, derivanti da studi consideranti i carichi applicati e le condizioni d'esercizio:

tipo di acciaio	minimo valore singolo $K_{1c} \text{ Mpa} * m^{1/2}$.	minimo valore medio $K_{1c} \text{ Mpa} * m^{1/2}$
200 e 220	30	35
260 e 260 Mn	26	29
320 Cr	24	26
350 HT	30	32
350 LHT	26	29

4.17.2.7. Prova di crescita delle cricche per fatica

Questa prova si realizza attraverso la flessione su tre punti di un provino prelevato dal fungo della rotaia, avente sezione 20 x 45 mm e lungo 23 cm, che deve essere meccanicamente intagliato in mezzeria con solco profondo 10 mm. Per distinguere questi provini sulla loro faccia esterna viene stampata a caldo una H.

Ogni rotaia deve fornire almeno tre provini, che vanno testati secondo le seguenti condizioni:

- $15\text{ °C} < T < 25\text{ °C}$
- sollecitazione minima/sollecitazione massima = $R = 0,5$
- la distanza tra gli appoggi deve essere il quadruplo dell'ampiezza del provino, ossia 180 mm
- la frequenza con cui viene applicato il carico deve essere compresa tra i 15 e i 40 Hz
- atmosfera simile all'ambiente in cui opererà il pezzo

Anche in questo caso vengono forniti i valori massimi di crescita, che non devono eccedere quelli riportati nella seguente tabella:

Tipo d'acciaio	$\Delta K = 10\text{ Mpa} * m^{1/2}$	$\Delta K = 13,5\text{ Mpa} * m^{1/2}$
Tutti i tipi tranne 200 e 320 Cr	$17\text{ } m/G_c$	$55\text{ } m/G_c$

4.17.2.8. Prove di resistenza a fatica

Queste prove devono essere svolte in accordo a quanto riportato nella specifica ISO 1099 su un minimo di 3 provini per ogni rotaia, prelevati dalla parte esterna del fungo. Per stimare il limite a fatica (L_f) occorrono più prove, che vanno condotte con delle tensioni (σ_i) decrescenti, cui corrispondono delle rotture dopo un numero di cicli (N) sempre maggiore, fino ad individuare il carico per il quale non si ha rottura (σ_n). A questo punto attraverso delle tecniche statistiche si può individuare L_f come un valore compreso tra σ_n e σ_{n-1} e grazie alle leggi di Wohler si può affermare che sotto tale valore non esiste numero di cicli che porti il materiale a rottura. L'individuazione di tale parametro quindi permette la stima del numero di passaggi che potrà reggere la rotaia prima di rompersi, quindi la sua vita utile a partire dalla conoscenza dell'ambiente e la linea in cui opererà.

La prova viene condotta grazie all'ausilio di un macchinario, che opera con temperatura compresa tra i 15 °C e i 25 °C sollecitando i provini a trazione e compressione alternatamente in modo costantemente monitorato con un ciclo di carico simmetrico rispetto allo zero iniziale. I provini portati a rottura presentano un aspetto caratteristico della sollecitazione a fatica, difatti sulla superficie della frattura si osserva una zona di aspetto opaco, dal quale ha origine il cedimento, caratterizzata da una serie di linee parallele. In questa zona si ha l'innescò della frattura, che progredisce senza apprezzabili deformazioni sotto l'azione dei carichi, la cui applicazione genera le suddette linee. L'avanzamento della cricca determina una progressiva riduzione della sezione utile resistente, di conseguenza si arriva a una rottura improvvisa, che comporta la formazione di una seconda zona cristallina, brillante e liscia nettamente differente dalla prima.

Il cedimento improvviso tipico di questa rottura è molto pericoloso per la sicurezza dell'esercizio, pertanto è fondamentale il controllo e il monitoraggio superficiale e strutturale, in modo da evitare il più possibile l'innescò e la propagazione di questo fenomeno, in particolare è necessario prestare molta attenzione durante la messa in opera, in modo che non si creino situazioni che possano innescare cricche sotto la suola, perché esse sono particolarmente pericolose in quanto difficili da individuare e monitorare.

Affinché il test risulti passato la rotaia deve essere in grado di resistere a numero di passaggi almeno pari a 5×10^6 prima di rompersi.

4.17.2.9. Stress residuo nella suola

Le sollecitazioni residue provenienti da raffreddamenti disomogenei, o da operazioni come raddrizzatura e livellamento sollecitano internamente le rotaie portandole a diminuire la loro resistenza nei confronti delle rotture a fatica. Queste, combinate con le sollecitazioni proprie dell'esercizio, possono condurre alla fine prematura della vita utile delle rotaie e quindi a potenziali incidenti.

Questo test si effettua prelevando spezzoni lunghi 1 m ponendosi a 3 m dall'estremità della rotaia e va condotto su sei provini differenti, che devono essere accuratamente puliti e trattati con sostanze che impediscano alla superficie di scaldarsi eccessivamente. Di questi provini una parte viene distrutta per effettuare il test, mentre le restanti parti possono essere utilizzate per altre prove.

Esistono diversi metodi per effettuare la misurazione, ma il più utilizzato, nonché quello prescritto dalle norme vigenti è il cosiddetto "Transverse Template Cutting Method". Questo sistema misura indirettamente le tensioni per via meccanica, andando a misurare la modifica subita dal volume del materiale in conseguenza all'asportazione di parte di esso, che altera l'equilibrio delle forze interne al materiale. La stima viene effettuata con un misuratore automatico di deformazioni, che deve essere lungo 3mm e avere un fattore di precisione almeno dell'1%. Tale dispositivo viene attaccato sotto la mezzeria della suola prestando attenzione a non modificare lo stato tensionale proprio del provino. Le misurazioni sono due: una sul provino intero lungo un metro, mentre per la seconda si isola una porzione di rotaia lunga 20 mm, nella quale rimane una microdeformazione residua. La differenza di deformazioni misurata prima e dopo aver tagliato il provino permette di calcolare lo stress residuo attraverso la seguente formula:

$$\sigma = E * \varepsilon$$

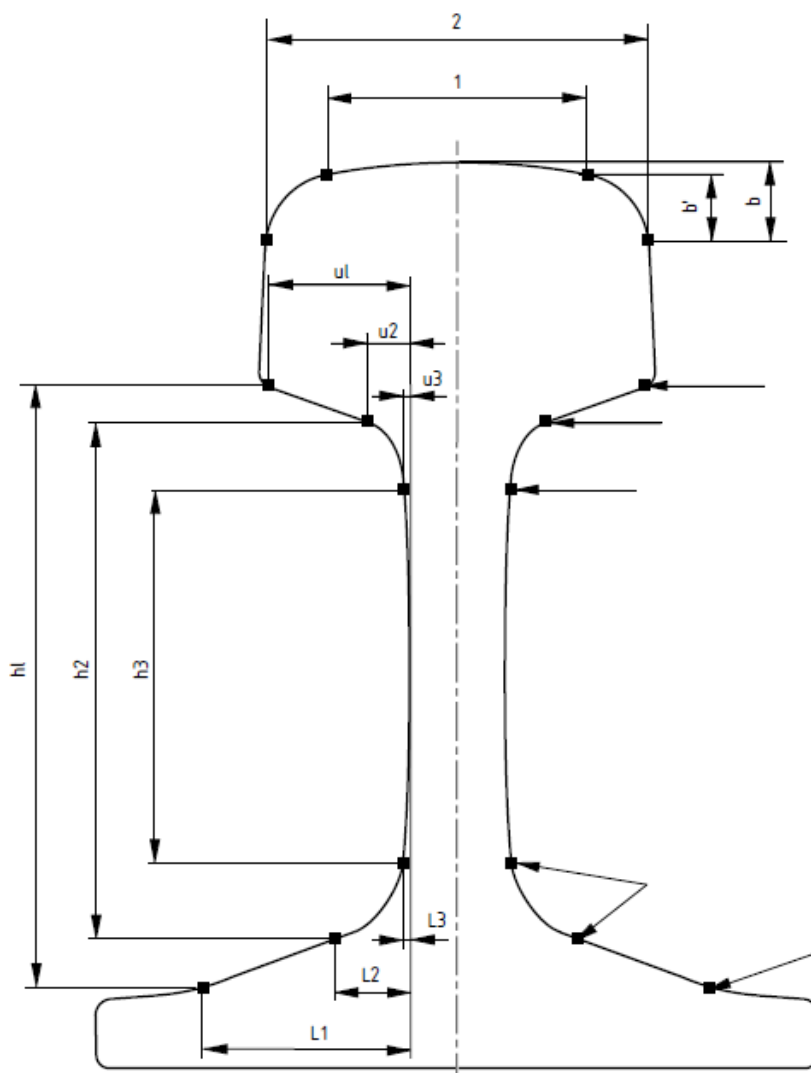
in cui ε è la differenza di microdeformazione ed E ha valore standard pari a $2,07 * 10^5 \text{ N/mm}^2$.

Affinché la prova risulti superata il valore di sollecitazione misurata, tipicamente di trazione, deve essere inferiore ai 250 N/mm^2 per ogni tipo di rotaia.

4.18. Centro servizi

Gestisce l'immagazzinamento delle rotaie, gli ordini e tutte le ulteriori operazioni esplicitamente richieste dal cliente, il quale al momento dell'acquisto deve esplicitare una serie di standard caratterizzanti il prodotto da lui richiesto in modo che questo sia in grado di espletare al meglio la sua funzionalità, i parametri sono:

- il tipo di profilo richiesto: ce ne sono 21 disponibili, tutti diversi e le cui grandezze sono definite in normativa, per cogliere meglio la complessità della trattazione si riporta il disegno cui vengono riferite tali misure:



- il tipo di acciaio di cui deve essere composto il profilo e deve essere eletto tra i tipi elencati in precedenza
- indicare se il profilo deve essere di classe "X" oppure "Y", che indicano due classi di tolleranze dimensionali differenti

- la classe di rettilineità desiderata, che può essere “A” oppure “B” in cui è quella che ammette una minore tolleranza di errore
- la lunghezza delle rotaie
- tutto quanto necessario a definire nel massimo dettaglio possibile i requisiti che devono soddisfare le forature delle rotaie
- tipo di marchio particolare utile all’acquirente per identificare in modo univoco un determinato elemento

4.19. Saldatura

Non tutte le rotaie dichiarate idonee al servizio sono pronte per l'esercizio, alcune di queste necessitano ancora saldatura reciproca per poter raggiungere la lunghezza di impiego. Ad oggi questa operazione coinvolge anche tutte le rotaie in opera, che saldate insieme vanno a costituire quella che viene definita la lunga rotaia saldata. Le rotaie vengono saldate con processi autogeni, ossia coinvolgendo il materiale base nella formazione del nuovo giunto. Le operazioni in stabilimento sono realizzate con macchina saldatrice, che esegue la lavorazione automaticamente, servendosi solitamente della saldatura elettrica a scintillio, che differisce dalla modalità alluminotermica perché non necessita di metallo d'apporto. Con questo processo le rotaie che devono essere saldate vengono premute l'una contro l'altra e grazie a una corrente elettrica che le attraversa vengono portate ad altissima temperatura che ne permette la fusione in un unico pezzo. Il principio è lo stesso con il quale il un fabbro congiunge due pezzi diversi per battitura.

L'operazione, essendo effettuata da una macchina automatica, ha basse possibilità di errore umano, difatti l'operatore deve solo predisporla al meglio. I vantaggi sono sicuramente l'assenza del materiale d'apporto e la resistenza molto maggiore rispetto alla saldatura alluminotermica, che resiste circa la metà. Quest'ultima però può essere realizzata anche con attrezzature mobili, pertanto ha un campo di applicazione più ampio.

La procedura di saldatura inizia assicurando una testa a una morsa fissa e l'altra a una morsa mobile in modo che le due sezioni combacino perfettamente, a questo punto la macchina procede automaticamente fino a saldatura ultimata seguendo queste operazioni: preriscaldamento di una durata di massimo 10 secondi, nel quale una corrente di intensità 30000 Ampere circa fonde le facce a contatto e innesca lo scintillio. A questa fase segue un riscaldamento di circa 3 minuti, durante il quale si ha il caratteristico moto di pendolamento che avvicina e allontana le teste, che ha la funzione di scaldare le rotaie per contatto diretto quando queste sono vicine, mentre quando vengono allontanate di poco invece si innescano degli archi elettrici, che portano la temperatura delle rotaie a circa 6000 °C fondendole. La lavorazione prosegue con una fase detta bruciatura, della durata di circa un minuto, durante la quale il moto di pendolamento è più lento, ciò porta l'arco elettrico ad avere una

maggior importanza, tanto da portare il consumo delle teste fino a 15 mm. Il riscaldamento seguente è caratterizzato dalla messa in moto della morsa mobile, che dura circa 2 secondi e alla fine di questo la corrente viene staccata automaticamente. Il risultato finale è che le due facce della rotaia vengono reciprocamente compenstrate e il materiale in eccesso viene espulso perimetralmente, questo implica la necessità di un lavoro di molatura atto a ripristinare il corretto profilo originario. A questo punto la saldatura è finita e il pezzo ricavato viene testato a flessione per verificarne la tenuta, viene quindi inflesso fino a ottenere una freccia di 25 mm o più, a seconda del tipo di rotaia in analisi. Se l'esito è negativo è necessario asportare la parte di rotaia saldata, rieffettuare la lavorazione e verificarla nuovamente. Se invece l'esito è positivo se ne valuta la rettilineità e una volta accertata positivamente anche questa la rotaia è pronta per il trasporto.

Per quanto concerne invece la saldatura in opera il metodo maggiormente utilizzato è sicuramente la saldatura alluminotermica, che è normata dalla UNI EN 14730-1, recepita in Italia nel 2008 dalla specifica RFI TCAR SF AR 07 005 B. Questo metodo si è affermato perché l'attrezzatura non è particolarmente costosa, ingombrante o pesante, è facile da mantenere, revisionare e sostituire, inoltre è adatta a contesti in cui lo spazio e il tempo sono ristretti, non sviluppa particolari gas e permette una bassissima dispersione di calore, quindi di energia. Anche in questo caso la procedura è stata progressivamente migliorata nel tempo, soprattutto per minimizzare la possibilità di errori umani.

Il materiale d'apporto della saldatura è costituito principalmente da ossido ferrico (Fe_2O_3), alluminio (Al) e altri elementi come: carbonio, silicio e manganese atti a fornire le caratteristiche meccaniche volute al giunto di saldatura. Durante la reazione l'alluminio brucia e sviluppa moltissimo calore, facendo raggiungere alla miscela una temperatura intorno ai 3000 °C, in corrispondenza della quale tutto il materiale presente è liquido, si ha dunque la separazione dell'ossido di alluminio dal ferro, in particolare quest'ultimo si dispone più in basso perché più pesante, mentre il primo galleggia sotto forma di scoria. Il ferro liquido quindi viene colato sulle parti metalliche da saldare e ne rimane inglobato garantendone la continuità. Questa operazione viene condotta con l'ausilio di forme insensibili alle alte temperature che vengono raggiunte.

Le operazioni che vengono eseguite con questa modalità sono le seguenti:

- preparazione delle forme: una volta venivano costruite caso per caso, oggi sono prefabbricate e questo consente di risparmiare tempo, oltre che aumentare la qualità e l'omogeneità delle lavorazioni. Le forme svolgono un ruolo di primaria importanza, perché è fondamentale che il ferro fuso rimanga a contatto con le testate da unire per un certo tempo, affinché l'operazione vada a buon fine. Essa è composta da due involucri simmetrici rivestiti di materiale refrattario detti staffe, che devono essere posizionate con estrema cura dagli operatori, in modo da formare un profilo di rotaia perfetto e impermeabile, grazie anche a un morsetto che li tiene insieme. Ai lati della forma due materozze raccolgono le scorie formatesi durante la reazione.

La prima operazione da portare a termine è il taglio della rotaia, effettuato con apposita sega, che garantisce un'adeguata precisione dell'operazione. La porzione da tagliare è funzione dei tipi di rotaia da saldare e in generale varia tra i 25 e i 50 mm. Una volta effettuato il taglio, le forme devono essere posizionate correttamente, poi rivestite esternamente con materiale refrattario, che deve intasarne tutto il perimetro andando a impermeabilizzarlo completamente in modo che non vi siano fuoriuscite di materiale d'apporto. Particolare attenzione deve essere prestata in modo che tale materiale non finisca all'interno della forma, perché altrimenti costituirebbe un'inclusione non metallica indesiderata che pregiudicherebbe la buona riuscita del lavoro. La composizione del materiale refrattario è molto importante, generalmente è in gran parte silicio, poco più del 90%, accompagnato da circa il 6 – 7% di argilla e le sue condizioni di umidità, finezza e permeabilità devono permettere a gas e vapori, che si generano quando il metallo cade nella forma, di poter uscire liberamente dalla forma, altrimenti possono dar luogo al ribollimento dell'acciaio fuso, che può causare delle cavità all'interno della saldatura. Non va dimenticato di verificare che i fori semiverticali, attraverso cui fuoriescono i gas e il materiale in eccesso dalla forma, siano completamente sgombri in modo da non costituire alcun tipo di impedimento alla lavorazione.

È importante infine sottolineare come ogni diverso tipo di rotaia necessiti le sue staffe e il suo modello, quindi un'attrezzatura appositamente concepita. Esistono anche forme concepite per accoppiare rotaie di diverso tipo, in

questo caso è necessario prestare particolare attenzione durante la predisposizione, perché devono combaciare perfettamente.

- prima di procedere al preriscaldamento è necessario asciugare bene la zona da saldare e pulire con la spazzola metallica le testate. Successivamente si allentano gli organi di attacco di un certo numero di traverse vicino alla zona in cui deve essere effettuata la lavorazione e si livellano perfettamente le rotaie con l'ausilio di cunei di legno. Da quest'ultima operazione è bene che risulti una piccola cuspidine, perché poi durante il raffreddamento della saldatura si ha un abbassamento dovuto al fatto che il fungo raffredda più lentamente della suola.

Si ricontrolla poi la simmetria e la livellazione delle forme e la tenuta perfettamente aderente tra forma e rotaia.

- preriscaldamento: è la fase che precede la colata dell'acciaio fuso, esso viene realizzato utilizzando un gas proveniente dalla combustione di un carburante, che oggi può essere gas propano liquido, ossigeno o acetilene solitamente. Questo viene tenuto all'interno di bombole e mandato a un gassificatore per mezzo di un tubo di gomma e dopo la sua combustione viene convogliato nella forma, riscaldandola dall'alto verso il basso, in modo che si eviti l'insorgere di soffiature, che abbattano la vita utile della saldatura. Il gas deve riscaldare uniformemente le testate delle rotaie fino a fargli raggiungere una temperatura di circa 900 °C. L'operatore verifica a vista che vi sia un alone scuro che si restringe andando verso il centro, indice del fatto che è stata raggiunta una temperatura sufficientemente alta in corrispondenza della quale la rotaia assume un colore rosso vivo contrassegnante la fine di questa fase, la cui durata solitamente varia tra i 2 e i 3 minuti.
- al preriscaldamento segue l'esecuzione della saldatura, che deve essere eseguita abbastanza velocemente, affinché la temperatura raggiunta nel preriscaldamento non si abbassi eccessivamente. Difatti solitamente il crogiuolo è già stato preparato in precedenza in modo che risulti ben asciutto e pulito al momento della colata. Questa operazione oggi viene evitata attraverso l'adozione di pezzi monouso, perché in passato è stata fonte di errate lavorazioni. Successivamente si appone alla forma il suo tappo superiore, che impedisce al materiale di apporto di cadere direttamente all'interno della forma, deviandone il percorso. Il crogiuolo viene poi riempito con la miscela saldante, sopra la quale viene messa la

polvere di accensione, generalmente perossido di bario, che innescata con un mezzo di accensione permette di raggiungere una temperatura di circa 1000 °C, dando inizio alla reazione che dura circa 20 secondi. A questo punto la pressione apre il foro sul fondo del crogiuolo attraverso cui il materiale di apporto entra nella forma, la cui dimensione non deve eccedere i 13 mm di diametro, altrimenti l'operazione potrebbe risultare compromessa. Finita questa operazione è fondamentale rimuovere con attenzione le materozze in cui si sono convogliate le scorie galleggianti e posarle su qualcosa che non sia infiammabile vista la loro altissima temperatura. Dopo circa 2 o 3 minuti il materiale ha finito di solidificare, pertanto si possono togliere le staffe e si procede a una rimozione grossolana dei pezzi in eccesso rispetto al profilo voluto, che va effettuata con molta cautela per non pregiudicare la forma del profilo. A raffreddamento completato questa operazione viene affinata attraverso l'utilizzo di una mola a smeriglio. Sul gambo e sulla suola rimangono degli ingrossamenti che vanno puliti in modo da poter controllare visivamente la buona riuscita della saldatura.

Qualora si ravvisassero difetti è necessario approfondire l'esame per determinarne estensione e profondità. Infine va precisato che non è consigliabile accelerare il processo di raffreddamento, perché potrebbe dare luogo a pericolose tensioni interne, pertanto operando in ambienti freddi si consiglia di dotarsi di mezzi di protezione del giunto saldato, per consentirne un adeguato e lento raffreddamento

Il risultato finale cui si giunge con questo metodo è caratterizzato da una zona termicamente alterata piccola, che determina un ottimo comportamento del giunto. Questo metodo si è affermato anche perché contraddistinto da tempi utili a completare l'operazione molto ridotti, pertanto permette alta produttività del personale, quindi un vantaggio economico.

I controlli cui vengono assoggettate le saldature completate riguardano innanzitutto la loro planarità sia verticale, sia orizzontale, che vengono verificate con apposite aste nei due metri di rotaia aventi al centro la saldatura. Le frecce invece si misurano con appositi spessimetri e non devono risultare maggiori di quelle rilevate nelle restanti parti della linea. Si eseguono inoltre una serie di prove atte a verificarne la completa accettabilità:

- la porzione saldante deve essere analizzata chimicamente in modo da verificare che contenga massimo lo 0,05% di zolfo o fosforo e la loro somma non deve comunque superare lo 0,09%
- uno spezzone lungo 1,5 metri viene posto su due appoggi tondi e liberi di ruotare distanti 1,1 m con al centro la saldatura e sollecitato con carico dinamico di intensità differente a seconda del tipo di rotaia, con una frequenza ≤ 10 Hz. Il carico viene applicato attraverso due rulli distanti entrambi 75 mm dalla zona saldata e affinché la prova risulti superata non devono risultare né rotture, né incrinature dopo un numero di cicli di carico pari almeno a 2×10^6 .
- si esegue anche una prova di durezza di Brinell al fine di verificare che la saldatura non presenti valori troppo diversi da quelli fuori dalla zona termicamente alterata. La prova deve essere condotta sul fungo 5 mm sotto il piano di rotolamento e il risultato non può differire di ± 20 unità HBW rispetto ai valori propri della rotaia in analisi

Le prove finali vengono reputate positive se risultano tutte superate, in caso contrario è necessario effettuare almeno due riprove del test fallito, con le stesse modalità viste in precedenza. Se anche solo una di queste risulta non superata, il lotto viene rifiutato, se la prova in oggetto è quella di carico dinamico sarà necessario rifiutare tutti i lotti. Se invece il controllo risulta superato la saldatura viene marchiata come conforme alle normative.

5. Fenomeni di deterioramento e avarie delle rotaie

Dal momento della posa in opera le rotaie iniziano la loro vita utile, che a volte può essere minore del previsto a causa di una serie di fattori che possono portare alla sua rottura, o comunque a essere inadeguata allo svolgimento della sua funzione, tali fattori possono essere: struttura e proprietà del materiale, stato di sollecitazione da cui derivano spostamenti, vibrazioni e abrasioni, l'ambiente esterno e la temperatura d'esercizio. I materiali d'armamento sono sempre soggetti a deterioramento, tuttavia una particolare attenzione alla manutenzione può ritardare questi fenomeni, di cui i principali sono: la fatica, la corrosione, l'ossidazione e l'usura, pertanto si ritiene interessante approfondirli. Nel seguito quindi si discuterà sia di questi argomenti, sia di tutti i fenomeni di deterioramento tipici delle rotaie.

5.1. La fatica

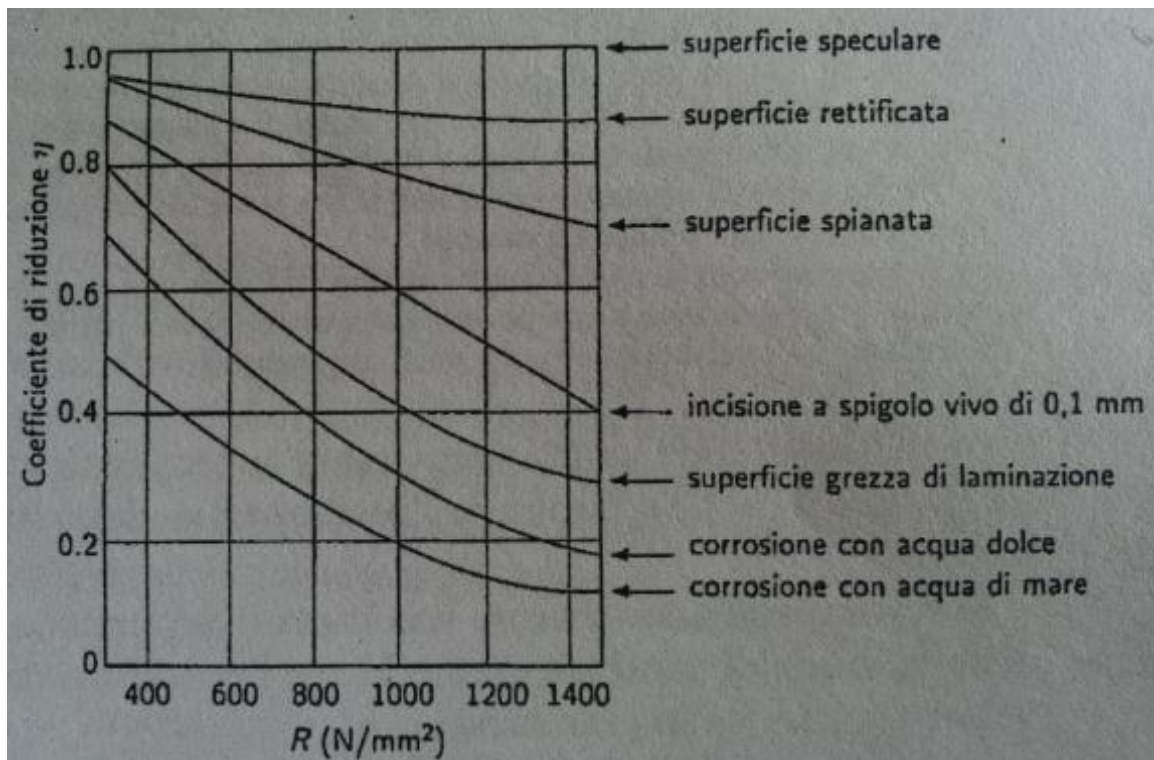
Nonostante l'enorme progresso tecnologico che ha coinvolto anche la scienza dei materiali, le sollecitazioni ripetute sono ancora la prima causa di rottura degli elementi durante l'esercizio.

Per chiarire meglio quelle che sono le dinamiche che portano a questo tipo di rottura è necessario tenere sempre presente che tutti i materiali hanno dei difetti al proprio interno. Le vacanze reticolari ad esempio non costituiscono un pericolo nei confronti di questo fenomeno, tuttavia non si può dire lo stesso per quanto concerne le dislocazioni e le strutture policristalline, che influenzano il comportamento dei metalli a livello microscopico. Le inclusioni non metalliche invece sono ancor più pericolose perché interrompono la continuità del metallo, difatti l'attenzione nei loro confronti durante i controlli di conformità è molto elevata. Infine risultano molto pericolose anche le tensioni residue, che possono avere diverse origini e determinano delle sovratensioni localizzate in corrispondenza di difetti o inclusioni, tuttavia

possono essere eliminate completamente attraverso opportuni trattamenti termici di distensione.

I massimi valori di sollecitazione per quanto concerne flessione, torsione e sforzo assiale pulsante vengono raggiunti in corrispondenza della superficie dei pezzi. Questo fatto viene ancor più aggravato dalla presenza di difetti più o meno accentuati, che portano all'insorgere di sovraccarichi dinamici durante l'esercizio. Di conseguenza è fondamentale curare al meglio tali zone, come testimoniato anche dai valori delle tolleranze dimensionali ammesse trattate precedentemente. Un'altra considerazione fondamentale è che i test da cui si evince il limite teorico di resistenza (L_f) vengono condotti su provini in condizioni praticamente perfette. Invece durante l'esercizio le imperfezioni derivanti dall'applicazione di carichi alternati si accumulano dando luogo ad agglomerati di difetti che possono portare alla formazione di microfessure, che fungono da vie preferenziali di progressione dei meccanismi di rottura, favorendo quindi l'abbassamento progressivo di L_f . Stesso effetto ha anche l'azione contemporanea di sollecitazioni e corrosione, tanto da portare a zero la sollecitazione minima in corrispondenza della quale il danneggiamento non continua a crescere. Anche la forma del pezzo influenza molto la resistenza a fatica, difatti restrizioni di sezione, per quanto possano essere lievi, implicano una concentrazione delle tensioni e delle deformazioni, stesso discorso per la presenza di forature e intagli, soprattutto se a spigolo vivo, che risulta assai deleteria.

Le considerazioni fatte risultano tanto più accentuate, quanto maggiore è la resistenza del materiale, difatti per questi materiali il limite di fatica pratico, indicato con L'_f , si riduce più velocemente fino a valori anche minori del 10% di L_f . Tale tendenza è mostrata nel seguente grafico



Da quanto scritto quindi risulta difficile trovare metodi efficaci per l'innalzamento di L'_f , inoltre è chiaro che le prove di laboratorio non sono rappresentative delle reali condizioni di esercizio, pertanto i loro risultati vanno presi in considerazione con la giusta cautela. Per questo motivo risulta fondamentale un monitoraggio costante delle condizioni di fatto degli elementi a prevenzione di rotture inaspettate, si deve quindi mirare a un costante miglioramento dei mezzi di indagine che possano consentire di individuare le microfessure, responsabili della progressiva riduzione della sezione resistente. Nel campo della ricerca si è investito molto anche per cercare delle relazioni empiriche che legassero l'entità delle sollecitazioni con la velocità di propagazione delle cricche, in modo da poter essere in grado di stimare il tempo in cui ci sarà il probabile collasso del pezzo, cosa che permette di sapere se la crescita della cricca sarà progredita sostanziale o meno prima del controllo successivo. Questo tipo di procedimento, denominato "fail safe" si basa su controlli periodici non distruttivi che mirano a evidenziare la presenza di difetti potenzialmente dannosi e si applica a componenti sollecitati relativamente poco frequentemente, ma la cui rottura potrebbe avere conseguenze catastrofiche, come nel caso delle ferrovie. Una delle equazioni proposte per questo metodo è quella di Paris, ossia:

$$\frac{da}{dN} = C * \Delta K^n$$

nella quale:

- a rappresenta la dimensione della cricca
- N è il numero di cicli
- ΔK è il fattore di intensificazione degli sforzi calcolato per i massimi e i minimi sforzi previsti nel ciclo di sollecitazione
- C e n sono due costanti funzione del tipo di materiale in analisi

Questa legge risulta di ottima applicazione per velocità medie di propagazione. Sotto determinati valori soglia di ΔK invece non si riesce a cogliere la velocità di propagazione, tale valore è da interpretare come il limite sotto al quale la cricca non progredisce.

Si pone quindi il problema di alzare il più possibile il limite a fatica in esercizio e questo può essere fatto agendo su quattro aspetti fondamentalmente: il disegno del pezzo, la scelta dei materiali e del ciclo di lavorazione, il controllo di accettazione dei semilavorati e dei pezzi finiti in sede di fabbricazione e i controlli durante l'esercizio.

Del disegno dei pezzi si è già parlato, esso deve essere spinto al massimo livello di dettaglio possibile, evitando bruschi restringimenti di sezione e fori o intagli nelle parti maggiormente sollecitate. Qualora un pezzo si rompesse spesso per fatica sarebbe necessario un sua nuova designazione, anche se questo implicasse il cambio di altri pezzi.

Dalle scelte dei materiali e del processo produttivo invece derivano le condizioni finali superficiali dei prodotti finiti, che come già discusso incidono in maniera decisiva sulla durata della vita utile dei pezzi. Per quanto riguarda la scelta dei materiali va detto che materiali altamente pregiati non sempre devono essere privilegiati, poiché più severe sono le condizioni d'esercizio e minore sarà conveniente la loro scelta, come testimoniato dal grafico precedente, nel quale si vede come determinati ambienti di esercizio possano abbassare di moltissimo i limiti pratici di fatica a valori circa equivalenti a quelli di materiali scarsi, a fronte di resistenze iniziali molto diverse.

Il limite di fatica pratico e quello teorico sono legati dalla seguente relazione:

$$L'_f = \eta * L_f$$

Pertanto ciò su cui è fondamentale agire, è il coefficiente di riduzione η , che deve rimanere il più elevato possibile. Per fare questo si dovranno rifinire con

la massima cura possibile le zone in cui è probabile che avvenga l'inesco di una cricca, oppure si può operare un incrudimento avente lo scopo di indurire la superficie e livellarne le asperità. L'indurimento superficiale, i cui alti valori sono tipici di lavorazioni come la nitrurazione, la cementazione e la tempra superficiale, innalza molto il valore di durezza e viene realizzato in modo che il limite di fatica pratico superficiale raggiunto sia molto maggiore delle sollecitazioni tipiche cui viene assoggettato il pezzo. Questo implica che affinché si abbia l'inesco di una cricca si devono superare le massime tensioni ammesse sotto lo strato indurito, le quali corrispondono ai limiti teorici calcolati, pertanto attraverso l'impiego di queste lavorazioni di fatto si elimina la dipendenza da η .

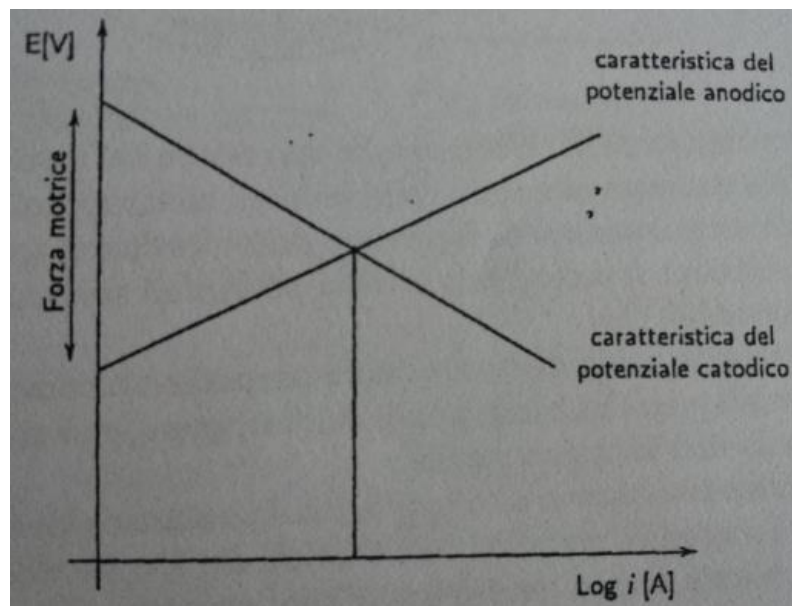
Anche la protezione dalla corrosione riveste un'importanza fondamentale, i processi attraverso cui essa si può concretizzare sono molteplici e mirano ad evitare l'abbattimento verticale di η conseguente alla contemporanea azione di corrosione e sollecitazione.

Altri aspetti su cui si può agire per ridurre la probabilità di innesco sono un attento controllo di accettazione del prodotto finito e un monitoraggio costante durante l'esercizio. Dei controlli di accettazione si è già discusso in precedenza e ovviamente mirano a verificare che un pezzo sia esente da difetti che potrebbero pregiudicarne la piena funzionalità per l'intera vita utile. I controlli in esercizio invece mirano all'individuazione di danneggiamenti o inneschi di cricche potenzialmente pericolose e vengono realizzati operando dei controlli non distruttivi, i cui risultati vengono annotati per poter cogliere al meglio l'evoluzione nel tempo della condizione del pezzo.

5.2. Corrosione e ossidazione

La corrosione dei metalli è stato uno dei maggiori problemi da affrontare fin dagli albori della rivoluzione industriale e ancora ad oggi è un campo in cui si investe molto per quanto riguarda la ricerca. Si possono distinguere due tipi di corrosione: a umido quando il metallo è a contatto con un liquido, a secco quando non lo è e prende il nome di ossidazione.

In generale i metalli, esclusi quelli “nobili”, sono in costante trasformazione e tendono a formare i composti primordiali in cui si trovavano inizialmente sulla terra, come: ossidi, idrossidi, carbonati ecc. Queste trasformazioni di tipo elettrochimico vengono chiamate corrosione e si sviluppano tra un anodo, che cede elettroni subendo un’ossidazione, e un catodo, che li ricevendoli si definisce ridotto. C’è quindi uno scambio di cariche elettriche, che può espletarsi grazie alla presenza di un elettrolita e alla differenza di potenziale elettrochimico presente tra anodo e catodo. La velocità di corrosione è proporzionale all’intensità di corrente con cui avviene il passaggio di cariche, che a sua volta è inversamente proporzionale al potenziale elettrochimico, come mostrato anche dal seguente grafico:



Il valore della corrente per cui i valori di potenziale di anodo e catodo si equivalgono, è un parametro molto importante perché fornisce un’indicazione della velocità con la quale avviene la trasformazione. Quest’ultima tuttavia non è individuata univocamente, ma dipende dai composti risultanti dal processo, dal tipo di elettrolita e molto altri fattori.

Per le rotaie questo fenomeno è causa di rapido deperimento, soprattutto in galleria, dove gambo e suola possono ossidarsi molto velocemente, particolarmente in corrispondenza di caviglie, piastrine, attacchi e nelle zone di contatto tra suola e massicciata. La corrosione in corrispondenza degli attacchi costringe a spostarli continuamente, finché la suola non è erosa in tutta la sua estensione e a quel punto si è costretti a cambiarla qualunque siano le condizioni del fungo.

Si sono sperimentati diversi rimedi contro questo fenomeno, ad esempio variando la composizione chimica introducendo lo 0,3% di rame, oppure utilizzando rotaie temprate e dure, senza però ottenere risultati soddisfacenti. Esistono acciai resistenti alla corrosione, ma il loro costo non ne permette l'applicazione in ambito ferroviario.

Altre possibilità in questo senso sono quelle descritte nel seguito. La protezione anodica ad esempio, che consiste nell'innalzamento del potenziale anodico iniziale, che riducendo la differenza di potenziale col catodo ha come conseguenza una riduzione dei valori di corrente e quindi una minore velocità di corrosione. Questo metodo si utilizza laddove non ci sono pericoli per la vita umana, perché le condizioni ambientali possono mutarne l'efficacia.

Un altro metodo possibile è l'interposizione di materiale isolante dove si concretizza il contatto tra materiali aventi potenziali diversi, oppure eliminare la presenza di sostanze elettrolitiche come: sali e sostanza fortemente acide o basiche, senza le quali non si ha il passaggio di cariche. In realtà può accadere che i materiali hanno al proprio interno sia zone anodiche, sia catodiche, questo a causa del fatto che i metalli sono eterogenei, non sono mai costituiti solo da un'unica fase, pertanto il contatto con elettrolita da inizio a una trasformazione dalla quale gli anodi vengono attaccati. Quanto accade è equivalente a ciò che accade in una pila, ossia ioni metallici e ossidrili si muovono in direzione opposta all'interno dell'elettrolita e incontrandosi possono dare luogo a nuovi composti, che possono:

- andare in soluzione, in tal caso il composto non inibisce ulteriori reazioni
- formare un composto insolubile, che ha scarso valore protettivo se distante dalla zona corrosa
- formare un composto insolubile, che aderendo alla superficie del metallo blocca del tutto, o quasi, il progredire della reazione. Questa eventualità prende il nome di passivazione e può modificare anche significativamente

l'aggregabilità di un metallo, che in generale risulta minore a causa della sua mutazione chimica superficiale, che funge da barriera isolante con l'ambiente esterno.

I fattori che maggiormente influenzano la corrosione si possono dividere in tre categorie essenzialmente: ambiente aggressivo, metallurgici e condizioni e tempo d'impiego.

Per quanto concerne l'ambiente aggressivo il parametro da tenere maggiormente in considerazione è la natura dell'elettrolita, dipendente da molti fattori, in particolare dal pH della soluzione, per il quale si notano comportamenti diversi funzione della natura dei metalli: i metalli "nobili" non si corrodono, alcuni metalli invece, discostandosi dal pH neutro, vedono alzare di molto la loro velocità di corrosione, mentre altri tendono a formare composti basici, pertanto rimanendo in campo basico il loro strato protettivo tende a rafforzarsi. Il ferro ha un comportamento intermedio, perché tende a formare composti basici, tuttavia per valori di $\text{pH} > 12$ e ad alte temperature tende a velocizzare molto la sua corrosione, questo vale qualora le soluzioni considerate non sono ossidanti e contengono solo l'ossigeno presente in atmosfera. L'ossigeno presente in soluzione invece può avere due effetti completamente opposti sulla velocità di corrosione: peggiorativo se l'incremento della corrente di equilibrio è dipendente dal catodo, migliorativo se invece aumenta la stabilità degli ossidi protettivi presenti. Altro parametro fondamentale è la temperatura, il cui aumento fa aumentare la velocità di corrosione in generale, tuttavia questo non è sempre valido perché essa può influenzare la natura dei prodotti della corrosione, che possono risultare più o meno protettivi.

Per quanto concerne i fattori metallurgici, quello di maggiore importanza è sicuramente la composizione chimica della lega. A questo riguardo si può dire innanzitutto che al crescere del grado di purezza del metallo, cresce la sua resistenza alla corrosione, situazione tuttavia molto lontana dalla realtà applicativa, perché i metalli puri hanno scarse proprietà meccaniche, pertanto vengono sempre accompagnati dall'aggiunta di elementi di lega. Anche le dimensioni del grano influenzano la resistenza alla corrosione e i loro giunti possono essere una via preferenziale di propagazione dei fenomeni corrosivi, per questi motivi si sta cercando di sviluppare processi termici produttori delle leghe a struttura amorfa, i cui campi di applicazione riguardano principalmente

pezzi poco sollecitati meccanicamente operanti in ambienti fortemente corrosivi.

Anche i processi di lavorazione e la geometria delle superfici può influenzare molto i fenomeni corrosivi, soprattutto perché aumentano la superficie di contatto con l'ambiente esterno. Allo stesso modo anche il contatto con determinate sostanze o la presenza di sollecitazioni può portare alla formazione di zone di partenza per questi fenomeni o a una loro accelerazione.

Per quanto riguarda invece gli accorgimenti superficiali si possono menzionare: le vernici ad esempio, che proteggono la superficie del pezzo, tuttavia hanno lo svantaggio di essere abbastanza onerose e impongono applicazioni periodiche, oppure si possono utilizzare rivestimenti in materiale metallico, che impediscono il contatto diretto con l'ambiente aggressivo. Anche un monitoraggio costante a mezzo di controlli non distruttivi è molto utile, perché consente di localizzare le zone in cui avanza la corrosione e stimandone le possibili cause si possono prevedere rimedi differenti caso per caso. Inoltre si può: modificare il pH dell'ambiente in cui si opera eliminando anche elementi depassivanti e la presenza di ossigeno, si può cercare di variare la temperatura, isolare metalli diversi, aggiungere inibitori o utilizzare protezioni.

Esistono diversi tipi di corrosione:

- la corrosione uniforme è quel tipo di corrosione che attacca uniformemente tutta la superficie e intacca lievemente le proprietà meccaniche
- la corrosione intergranulare attacca i contorni dei grani che compongono il materiale ed è il fenomeno da cui si sono sviluppati gli acciai inossidabili, per i quali è molto pericolosa, perché provoca una riduzione della resistenza meccanica e della plasticità del metallo. Per evitare questo fenomeno si possono utilizzare diversi metodi come: ridurre al minimo il tenore di carbonio quando possibile, aggiungere piccole quantità di niobio o tantalio, che formano carburi sostituendosi al cromo evitando la decromizzazione, oppure assoggettare il materiale alla cosiddetta tempra di soluzione
- la corrosione sotto sforzo meccanico combina effetti elettrochimici, legati all'ambiente aggressivo, e meccanici, legati agli sforzi cui è sottoposto il materiale, con il risultato che la corrosione procede molto più velocemente rispetto ai singoli fenomeni. Si espleta attraverso una prima fase di formazione delle fessure e un secondo periodo in cui queste si propagano più o meno velocemente in funzione dei seguenti aspetti: composizione

chimico–strutturale della lega, suo stato di fatto e i trattamenti termici subiti, inoltre sono importanti la composizione chimica dell’ambiente che aggredisce e l’entità degli sforzi cui è soggetto il materiale

- la corrosione puntiforme, o vaiolatura, è molto insidiosa perché generalmente comporta l’attacco superficiale del materiale, ma si sviluppa prevalentemente in profondità, pertanto tende a ridurre progressivamente la sezione resistente. Anche qui si può distinguere una prima fase di innesco, generalmente in corrispondenza di punti deboli come: inclusioni o bordi dei grani ad esempio, e una seconda di accrescimento che si sviluppa con effetto autocatalitico, che significa che la velocità di reazione continua a crescere con effetto parabolico
- la corrosione interstiziale è un meccanismo che si sviluppa tipicamente in quei metalli rivestiti da pellicola protettiva di ossido e attacca le zone interstiziali in cui l’ossigeno fatica ad arrivare, come le fessure tra guarnizioni ad esempio
- l’ossidazione invece è una corrosione ad opera di un gas, l’ossigeno, che può andare a formare diversi prodotti interagendo con un materiale, in funzione della composizione chimica di quest’ultimo. L’ossido può essere: liquido, volatile, miscibile col metallo o disporsi intorno a tutto il materiale creando un “film” protettivo, che può proteggere il materiale da altri fenomeni, divenendo tuttavia pericoloso quando induce una riduzione di sezione troppo elevata



5.3. L'usura

La tribologia è la scienza che studia i fenomeni di interazione tra superfici in moto relativo, focalizzandosi su tutti i suoi aspetti: deformazioni dei materiali, attriti, corrosione, lubrificazione e soprattutto il deterioramento conseguente al continuo contatto, che porta progressivamente a una modifica dei profili superficiali come diretta conseguenza delle microasportazioni di materiale, da cui scaturiscono cali di rendimento e malfunzionamenti. Nel caso ferroviario questi fenomeni si concretizzano soprattutto in campata, ossia lontano dalle testate.

I fattori che influenzano maggiormente i fenomeni di usura sono:

- le caratteristiche dell'atmosfera e le sue variazioni
- la variazione della rugosità superficiale, che variando le microaree di contatto tra i materiali porta all'insorgere di deformazioni plastiche
- l'innalzamento della temperatura dove si concretizza il contatto, che può essere anche molto considerevole, può portare a una diminuzione della durezza e della resistenza del materiale, inoltre influenza il procedere dei processi chimici

Tutti questi fattori comportano una perdita in peso del materiale, che solitamente viene rapportata al tempo [g/anno], oppure può essere espressa come perdita di volume per lavorazione [$\text{mm}^3/n_{\text{lav}}$]. La necessità di valori maggiormente confrontabili e praticamente efficaci ha portato a introdurre anche il rapporto P/S , in cui P rappresenta lo spessore di materiale asportato e S la lunghezza percorsa in strisciamento. Le misure viste rimangono indicative comunque, perché è difficile tener conto del fatto che spesso ciò che si stacca dalle superfici rimane frapposto tra esse, aumentando la velocità di usura.

Durante l'esercizio l'usura si manifesta in un primo momento attraverso la comparsa di una zona lucida sul piano di rotolamento, che si allarga sempre più e livella tutte le asperità, aumentando l'area di contatto tra cerchione e rotaia. La seconda fase è quella in cui inizia il vero e proprio deterioramento del fungo, che vede primariamente un incrudimento che riduce la velocità di progressione del fenomeno, di per sé è bassa in rettilineo e più pronunciata nelle tratte tortuose, perché percorrendo una curva di piccolo raggio il bordino usura molto il fungo lateralmente strisciandoci, cosa che pone anche il problema di mantenere costante il valore dello scartamento. Ovviamente, a parità di raggi

di curvatura, maggiori sono le velocità di percorrenza e il numero di assi transitanti e maggiore è la velocità con cui procede il fenomeno. Negli ultimi decenni infatti si è assistito a un notevole inasprimento di questo problema, dovuto soprattutto al considerevole aumento di traffico.

I metodi con cui si possono indagare i fenomeni di usura sono essenzialmente due: in esercizio, che risulta essere molto oneroso ma più realistico, oppure in laboratorio, modalità che ha visto lo sviluppo di moltissimi test, coi quali si cerca di riprodurre al meglio le condizioni di esercizio agendo su: velocità relativa, temperatura, ambiente, area di contatto, stato superficiale, carico e materiali. Il grande numero di parametri su cui si può agire però rende i risultati difficilmente confrontabili, senza contare che i macchinari di prova spesso non sono perfettamente equivalenti.

Si possono distinguere diversi tipi di usura, in funzione di quanto accade al procedere del fenomeno, e sono:

l'usura adesiva si manifesta quando due superfici a contatto e in moto relativo hanno delle asperità che si saldano reciprocamente, per poi staccarsi per taglio in conseguenza al moto, generando la possibilità che piccoli pezzi di materiale si stacchino dagli organi in movimento. L'usura può essere più o meno pronunciata in funzione dei metalli e della resistenza del collegamento. Per descrivere al meglio questo fenomeno Holm e Archard hanno elaborato un'equazione, basata sull'ipotesi che le asperità con cui si concretizza il contatto tra le superfici siano semisferiche, che permette di calcolare il volume di materiale asportato per unità di lunghezza percorsa misurato in $\text{mm}^3/\text{m}_{\text{percorsi}}$ e indicato con Q:

$$Q = K * \frac{W}{H}$$

nella quale W è il carico totale, H la durezza del materiale meno duro, ossia quello più incline al distacco di materiale, mentre K rappresenta il coefficiente di usura adimensionale di Archard e permette di operare una classificazione dei materiali, anche se va specificato che comunque non fornisce alcuna indicazione sul meccanismo di usura. I valori di K possono variare moltissimo in funzione del carico applicato e generalmente si reputano accettabili valori $\leq 10^{-4}$.

L'usura abrasiva invece è dovuta all'interposizione di particelle tra le superfici di contatto, che creano dei veri e propri solchi superficiali nei materiali. Il fenomeno si concretizza qualora le particelle siano in grado di resistere alle sollecitazioni proprie del caso in analisi e affinché questo avvenga si reputa che debba verificarsi la seguente condizione:

$$\frac{H_a}{H_s} > 1,2$$

dove H_a è la durezza dell'agente abrasivo, mentre H_s quella della superficie abrasa. Anche la forma delle particelle influenza questo fenomeno, difatti una spigolosità accentuata lo aggrava. Le modalità con cui può avvenire sono essenzialmente due: rimozione del materiale per flusso plastico, oppure frattura fragile superficiale causata dagli agenti abrasivi.

Nel caso della rimozione per flusso plastico si può verificare l'eventualità che la particella staccatasi vada a divenire parte integrante delle superfici a contatto, caso per il quale il coefficiente di usura assume dei valori

$$5 * 10^{-3} < K < 50 * 10^{-3}$$

In alternativa le particelle staccatesi possono rimanere libere di muoversi tra le superfici a contatto e la situazione risulta meno grave della precedente, tanto che K assume gli stessi valori appena visti, ma di un ordine di grandezza più piccoli.

L'usura corrosiva si manifesta in determinati ambienti in cui avvengono reazioni di carattere chimico, che favoriscono il mutamento superficiale del materiale, da cui si ha la formazione di uno strato passivato, che avendo resistenza alle sollecitazioni minore è più incline ad essere asportato. Questo tipo di usura a volte è incentivata durante i rodaggi dei macchinari attraverso l'utilizzo di agenti poco corrosivi, in modo da ridurre le asperità dei materiali a contatto.

L'usura erosiva si concretizza quando il materiale è a contatto diretto con l'azione di un fluido in movimento, che contenendo particelle solide e liquide disgrega microscopicamente la superficie. Il fenomeno risulta ulteriormente accelerato se accompagnato da un'azione corrosiva, come nel caso delle acque marine ad esempio.

L'ultima modalità è quella per fatica e si verifica laddove si ha la ripetizione dell'applicazione di un carico, che può favorire il distacco di frammenti di

materiale che innescano i fenomeni appena visti ed è il tipico caso di ciò che accade nel mondo ferroviario.

Per incrementare la resistenza all'usura si può agire su uno dei seguenti parametri: condizioni di finitura superficiale, materiali e suoi trattamenti termici e il tipo di lubrificazione da utilizzare.

Per quanto riguarda la finitura superficiale c'è da dire che maggiore è la sua planarità e maggiore è la superficie di contatto, questo implica minori pressioni e quindi una maggior resistenza all'usura. Difatti si ha già avuto modo di constatare la grande attenzione prestata a questo aspetto della fabbricazione anche per questo motivo.

La lubrificazione ha il compito di ridurre o eliminare il contatto tra le superfici dei materiali attraverso l'interposizione di un lubrificante, che può essere liquido, come olii e grassi, oppure solido, come la grafite e il bisolfuro di molibdeno. Questo metodo trova applicazione in campo ferroviario soprattutto in curva, dove si verifica il contatto bordino-rotai e si può espletare attraverso due diverse apparecchiature: una montata sugli assi anteriori delle locomotive, che al ruotare del primo asse spruzza sull'interno del cerchione interessato dal contatto un velo di materiale lubrificante, il quale riduce l'attrito e quindi l'usura. Con questo metodo il consumo laterale delle rotaie è stato ridotto a circa 2-3 decimi di mm all'anno ed è un metodo che permette di lubrificare agilmente tutte le curve appartenenti alla linea, motivo per cui è quello prediletto. Il numero di locomotive provviste di questi dispositivi da fare transitare in linea ogni giorno è direttamente proporzionale al numero di assi in transito previsti sulla stessa.

In alternativa si possono prevedere degli apparecchi montati direttamente sui binari prima delle curve, questi dispositivi si azionano autonomamente al transito dei convogli e con le loro pompe emettono un quantitativo standard di lubrificante, che consente di ridurre l'usura di un quantitativo di metri di curva funzione del suo raggio. Tale valore si attesta intorno ai 2000 m, ma va considerato che la perdita di lubrificante durante la marcia in rettilineo è quasi nulla, quindi è un valore di percorrenza netta. Questo metodo ha permesso una notevole riduzione del fenomeno a fronte di costi di esercizio contenuti e ampiamente giustificati dal risparmio ottenuto in termini di usura, tuttavia deve essere accompagnato da una manutenzione e un controllo puntuali.

Per i trattamenti termici invece i più efficaci sono i processi di indurimento superficiale e quelli che migliorano la tenacità del materiale, in modo da evitare l'insorgere di rotture fragili negli strati sottostanti alla superficie. La porzione che deve risultare essere maggiormente dura ovviamente è quella del fungo, sia nella sua parte superiore, sia sul fianco, mentre il resto deve essere tenace. I metodi utilizzati per ottenere questi risultati sono molteplici: in passato si usava realizzare la rotaia con due acciai differenti, oppure si possono utilizzare dei processi che raffreddano diversamente le due parti della rotaia, portandola ad ottenere valori diversi di durezza, oppure possono avere composizioni chimiche diverse dall'ordinario che le portano ad avere proprietà differenti. Tutti i trattamenti termici cui vengono assoggettati i materiali non devono lasciare al loro interno delle sollecitazioni residue, inoltre tutte le lavorazioni, come forature o saldature ad esempio, vanno eseguite con estrema cautela perché risultano particolarmente delicate.



2204

5.4. Deterioramento delle testate

Al passaggio dei treni le ruote producono un effetto battente sulla testata della rotaia che riceve la ruota e questo genera uno suo appiattimento e successivo allargamento. Inoltre i moti di strisciamento delle ruote provocano trasporti di metallo, che alle estremità tendono a formare delle lamelle, che nel tempo aumentano di spessore e sporgenza. All'aumentare della temperatura le luci tra rotaie si chiudono, pertanto le lamelle vengono a sovrapporsi e a impuntarsi scheggiando le rotaie loro adiacenti; al diminuire della temperatura invece chiavarde, ganasce e fori vengono notevolmente sollecitate dalla contrazione termica dei materiali e per effetto dei carichi ripetuti si può giungere prima a un'ovalizzazione dei fori e successivamente alla rottura di uno degli elementi citati. In questa zona vi sono anche le saldature, che se non vengono realizzate e molate correttamente sono fonte di elevati sovraccarichi dinamici. Questi possono essere fonte di gravi indebolimenti del giunto stesso, che se trascurato può anche minare la sicurezza dell'esercizio.

Per ridurre questi inconvenienti si è fatto ricorso a diversi stratagemmi, come ad esempio: la riduzione del numero di giunzioni aumentando la lunghezza delle rotaie, smussare le testate per ridurre e tardare la formazione di bavature e lamelle, piastre di gomma poste sotto le rotaie per assorbire parte dell'urto derivante dal passaggio delle ruote. Gli attacchi devono essere serrati correttamente, perché se sono troppo allentati la rotaia è libera di scorrere e alle alte temperature può accadere che una rotaia prema sull'altra creando la possibilità di uno slineamento, mentre alle basse temperature i fori vengono sollecitati molto e possono essere fonte di lesioni, che successivamente possono diramarsi al resto della rotaia.

Un altro rimedio è l'utilizzo di rotaie aventi testate indurite attraverso trattamenti termici.



211

5.5. Deterioramento laterale del fungo

Questo fenomeno è tipico delle rotaie situate in curva ed è tanto più pronunciato, quanto minore è il raggio della stessa e quanto maggiore è il valore dell'accelerazione non compensata. Si manifesta tipicamente sulle rotaie esterne, che fungendo da guida nel moto in curva sono caratterizzate dall'attrito tra bordino e la faccia interna della rotaia. La conseguenza di questo fenomeno è un arrotondamento della zona dove si concretizza il contatto, che pur non essendo di per sé pericoloso, può facilitare il verificarsi di diversi inconvenienti, per questo motivo è necessario verificare periodicamente il profilo, che se troppo deteriorato deve essere sostituito. Questa operazione però non implica necessariamente la fine della vita utile di tali materiali, che difatti possono essere utilizzati in rettilineo ponendo la parte consumata dalla parte dell'interbinario, mentre le rotaie di cui prendono il posto possono essere utilizzate in curva dopo adeguata piegatura.



2203

5.6. Abrasioni

Le abrasioni si manifestano tipicamente sulla superficie di rotolamento della rotaia e si presentano scabrose e parzialmente ossidate. Possono coprire anche porzioni estese di ambe le rotaie ed essere profonde, in quanto prodotte dalla forza motrice della locomotiva in avviamento, che facendo slittare le ruote innalza molto la temperatura delle rotaie deformandole. Oppure può accadere la stessa cosa in frenata, perché se questa viene realizzata troppo bruscamente si ha uno strisciamento che può deformare le rotaie.

È un fenomeno che va osservato attentamente perché può essere causa di rotture e per porvi rimedio si asporta per molatura la parte danneggiata, sostituendola con del materiale d'apporto.



2221

5.7. Marezzatura

La marezzatura è un fenomeno di origine sconosciuta che intacca la superficie di rotolamento con ondulazioni lunghe dai 3 agli 8 cm e profonde alcuni decimi di mm, con creste lucide e valli opache. Il loro aspetto ondulato impedisce ai convogli un transito regolare, imponendogli di saltare da una cresta alla successiva, con conseguente produzione di rumore e vibrazioni, pericolose sia per l'armamento, sia per i mezzi. Prove condotte sulle zone danneggiate evidenziano che creste e valli hanno valori di durezza superiori a quelli che si manifestano caratteristicamente negli acciai da rotaia, tuttavia le creste presentano valori maggiori delle seconde.

Per eliminare questo difetto si ricorre alla sua asportazione attraverso molatura, nel catalogo è contraddistinta dal difetto numero 2201, come specificato nel disegno seguente.



2201

5.8. Cedimenti

Può accadere che sulle rotaie vi siano degli avvallamenti più o meno pronunciati, lunghi anche qualche centimetro, che possono interessare la zona di raccordo del fungo o tutta la sua larghezza. Questi sono causati da scorrimenti dovuti a cedimenti interni del materiale, che possono essere dovuti sia a discontinuità preesistenti nel materiale, oppure a cause esterne e divengono una zona preferenziale di martellamento al passaggio dei treni, pertanto vanno monitorati correttamente perché tendono ad accentuarsi sempre di più, finché non si giunge alla rottura della rotaia. La frattura si presenta in modo molto simile a una dovuta a fatica ed ha una progressione lenta nel tempo. Si è osservato che i cedimenti hanno la caratteristica di ripetersi periodicamente nello spazio e sono accompagnati dalla presenza di impronte semisferiche, aventi diametro di circa 2–3 mm, che di fatto rompono lo strato di materiale incrudito e tendono a chiudersi attraverso il materiale trasportato, generando delle microcavità. Queste divengono poi avvallamenti per effetto dei carichi applicati dai convogli, nonché punto di innesco di fratture.

I rimedi contro questo fenomeno sono ancora scarsamente efficaci, ad esempio si è notato che apporti di metallo non fanno altro che accelerare il processo di rottura, le cui origini sono ancora oggetto di studio.

5.9. Festoni

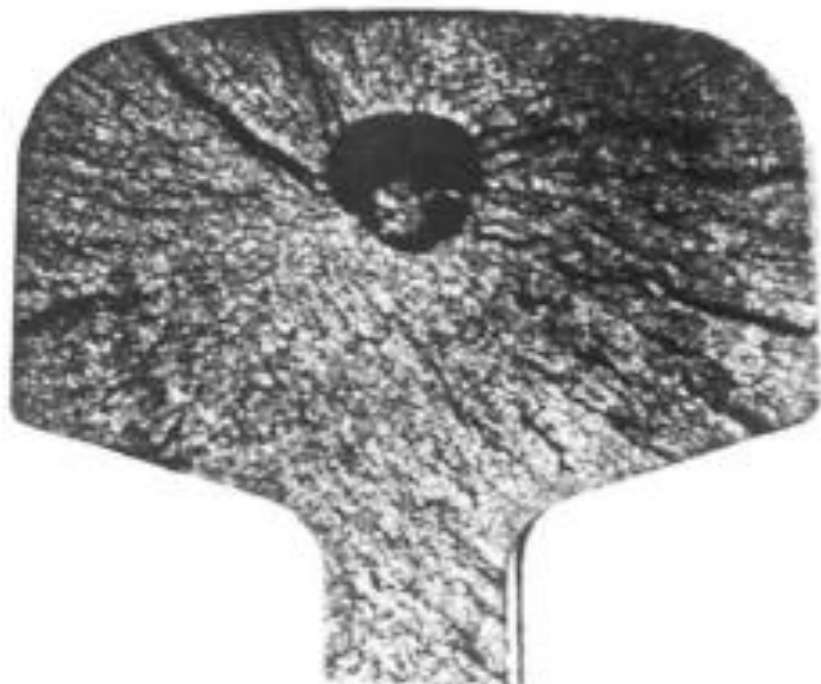
I festoni sono delle sottili lamine accumulate sui fianchi del fungo, verso l'esterno del binario, che si formano per scorrimento di materiale e che generalmente hanno spessori piccolissimi, ma lunghezze anche maggiori di un decimetro. Questo fenomeno può manifestarsi anche in rotaie nuove, ha origine principalmente da cricche o righe preesistenti ed è causato dai moti di serpeggiamento dei convogli, soprattutto sulle rotaie interne delle curve, oppure essere la prima manifestazione di un cedimento o una scagliatura.

Un loro esempio è fornito dal difetto 2222 del catalogo

5.10. Macchie ovali

Questo difetto è molto pericoloso perché spesso si manifesta solamente una volta che la rotaia è già rotta ed ha questo nome perché nella sezione fratturata è ben visibile una macchia scura e ovale sul fungo della rotaia. Il difetto si origina da un difetto interno o superficiale ed è contraddistinto da una progressiva riduzione della sezione resistente, che oltre un certo avanzamento non è più in grado di resistere alle sollecitazioni e quindi cede di schianto. La sezione rotta, generalmente perpendicolare al moto dei mezzi, si presenta liscia e opaca nella parte che ha ceduto nel tempo, mentre la restante parte è granulosa e lucente.

Questo difetto è abbastanza diffuso e per ripararlo è sufficiente asportare la parte interessata dal difetto e rimpiazzarla con una saldatura, nel catalogo dei difetti corrisponde al numero 211

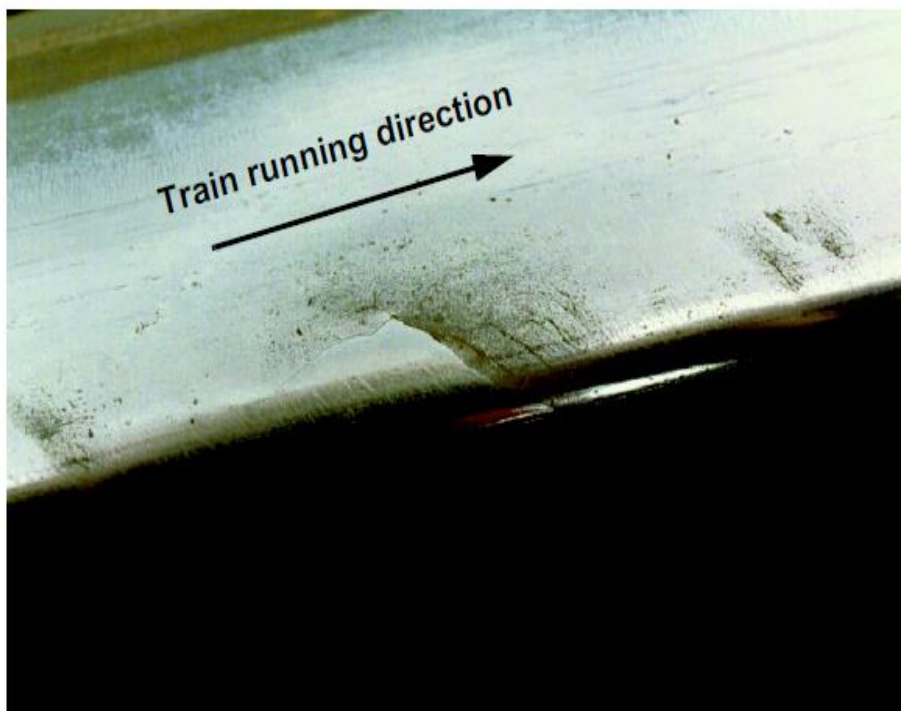


211

5.11. Scagliatura del piano di rotolamento

La scagliatura è un fenomeno tipico degli acciai temperati e consiste nella formazione di schegge o scaglie dovute al distaccamento di piccole parti di materiale conseguenza della ripetizione delle sollecitazioni in punti indeboliti dalla presenza di segregazioni o soffiature microscopiche. È un fenomeno che tende ad autoalimentarsi perché determina un peggioramento delle condizioni di contatto tra ruota e rotaia e se trascurato può propagarsi verso l'interno del fungo, portando a rottura la sezione.

Un esempio è dato dal difetto 222 del catalogo, come mostrato nella seguente figura



2223

5.12. Interventi esterni

Non va dimenticato che una causa di rotture o avarie delle rotaie possono essere anche interventi realizzati non idoneamente o in posizione particolarmente delicata. Ad esempio è sempre bene evitare di interrompere la continuità della suola con fori o quant'altro, perché questi divengono fonte di innesco di rotture. Inoltre è bene che i fori vengano realizzati non per mezzo di fiamme ossidriche, ma di trapani e in posizioni lontane da fori preesistenti per non indebolire eccessivamente piccole zone.

Per il resto tutti gli interventi devono essere condotti in modo ragionevole, attenendosi alle modalità prescritte nei capitoli, anche perché sono un costo che incide attivamente sul bilancio dei gestori delle reti, che hanno tutti gli interessi a minimizzarli.

5.13. Il catalogo dei difetti

I fenomeni di deterioramento visti finora possono portare le rotaie a rotture, cricche e danni di vario genere. Il catalogo dei difetti classifica questi inconvenienti in funzione della loro posizione sulla rotaia, la loro apparenza e la loro causa scatenante, inoltre esplica i metodi e i mezzi ottimali per la loro rilevazione ed eliminazione.

Al fine di rilevare difetti che potrebbero pregiudicare la sicurezza durante l'esercizio è fondamentale un monitoraggio continuo ed efficace, che deve essere in grado di fornire alle autorità competenti informazioni adatte alla rielaborazione sia per quanto concerne la loro qualità, sia il loro numero. Per questo motivo vengono utilizzati dei documenti chiari, precisi e facili da utilizzare, che consentano di identificare, notificare e classificare i difetti in modo da poter elaborare anche delle statistiche utili a: capire i difetti che si verificano più spesso, soprattutto nei primi anni di vita utile, e redarre un catasto di manutenzione, anche perché le ferriere danno una garanzia di almeno 5 anni sui loro prodotti e in caso si manifestassero difetti o altro le vengono addebitate.

Lo strumento principale di cui si serve il personale di linea è "il libro dei difetti", che contiene la definizione di qualunque difetto si possa incontrare, del suo posizionamento sulla rotaia, un codice che lo individua univocamente, le

raccomandazioni su cosa fare quando li si incontra, foto di comparazione e metodi di indagine ottimali per capirne meglio la gravità.

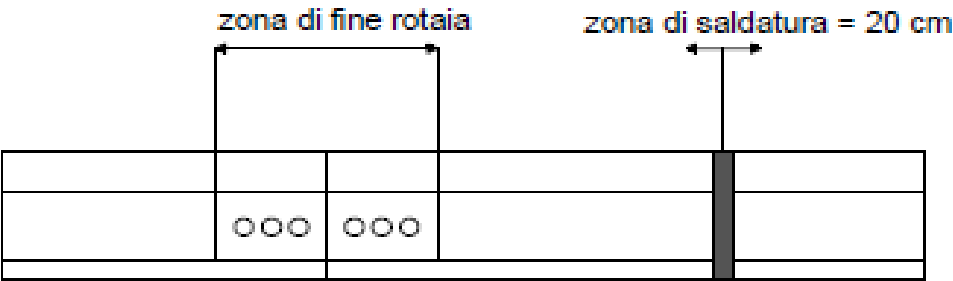
Non tutti i difetti possono essere investigati in linea, ma possono necessitare di approfondimenti in laboratorio e vanno sempre classificati secondo le modalità previste dal catalogo, attraverso l'utilizzo del "modulo di sostituzione di rotaia avariata o rotta", ovvero schede standard appositamente concepite per la registrazione dei dati, al fine di consentire una produzione chiara e rapida di dati di interesse con l'ausilio del computer. Le informazioni che vi sono riportate sono:

- tipo di difetto: rottura, crepa o danno
- locazione del difetto: linea, binario, rotaia e chilometro
- data: sia quella in cui si è scoperto il difetto, sia quella in cui esso è stato riparato o rimosso
- metodo col quale è stato scoperto
- caratteristiche della linea: curva e suo raggio o rettilineo, velocità massima ammessa in quel punto, codice di classificazione, tipi di traverse in quel punto, se si trova in galleria o meno e informazioni sul tipo di saldature nelle vicinanze
- informazioni sulla rotaia: il suo grado, profilo, lunghezza, condizione (nuova o usata), processi industriali cui è stata soggetta, se ha o meno delle marchiature
- codice del difetto individuato in accordo con il catalogo dei difetti
- azione che si decide di intraprendere per eliminare il difetto, corredata da uno schizzo o una foto che faccia maggiore chiarezza sulla sua posizione e le sue dimensioni

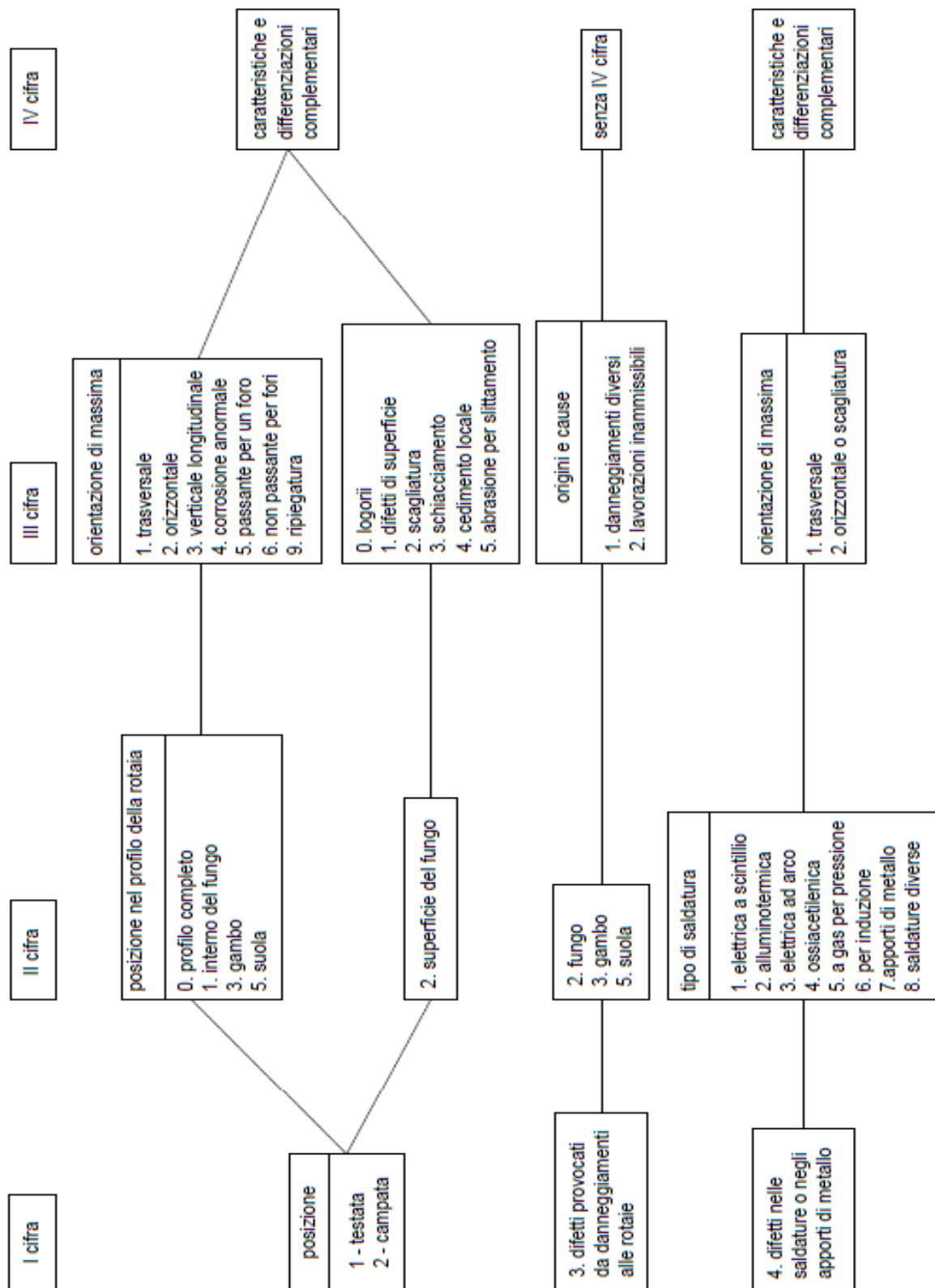
La compilazione del modulo deve essere attenta e scrupolosa, al fine di non falsare le statistiche dedotte da tali dati, tanto che vengono forniti esempi pratici di moduli già compilati e su ogni scheda sono riportate avvertenze e chiarimenti utili a non commettere errori.

I difetti trovati possono condurre a uno dei seguenti giudizi standard riportati dalla normativa: "mantenere la rotaia sotto osservazione", "rimuovere la rotaia in occasione della prima manutenzione periodica prevista", "immediata rimozione della rotaia", "circolazione sospesa fino alla rimozione della rotaia".

Nella figura seguente si individuano le zone che possono essere interessate da un difetto:



Si riporta ora lo schema rappresentante la codificazione dei difetti riportata in normativa, grazie alla quale ogni difetto può essere individuato univocamente:



6. Rimedi ai difetti

6.1. Introduzione

Senza un'adeguata opera di manutenzione la vita utile delle rotaie si abbassa notevolmente con conseguenze economicamente pesanti per le amministrazioni ferroviarie, difatti una delle voci che maggiormente influenza il prezzo per km della linea è proprio l'oneroso costo di sostituzione delle stesse. In un settore competitivo come quello dei trasporti, non è ammissibile lo spreco di risorse e quindi le amministrazioni ferroviarie di tutto il mondo si sono attivate per ottimizzare la manutenzione delle infrastrutture, anche perché i volumi di traffico, i carichi e le velocità di circolazione sono in costante aumento e di pari passo con queste aumenta l'usura, mentre si riducono i tempi disponibili per le operazioni di manutenzione.

Per rispondere a queste esigenze sono state create macchine che effettuano: la rettifica in opera delle rotaie, la ricerca tramite ultrasuoni di difetti interni alle rotaie, il rilevamento del profilo longitudinale e della sezione trasversale del fungo. L'utilizzo di tali macchine è diventato parte fondamentale dei programmi di manutenzione di ogni ente ferroviario e di gran parte delle aziende di trasporto pubblico di tutto il mondo.

Queste macchine vengono chiamate "treni molatori", un esempio è l'SRR16M1 perfezionato dalla Speno Spa, e hanno il compito di lavorare sui binari e riportare il loro profilo allo stato migliore per esercitare la sua funzione, perché così facendo si ha la migliore ripartizione dei carichi possibile, condizione che permette il funzionamento ottimale dei veicoli. Esistono diversi modelli, ognuno dei quali ha un campo di applicazione preferenziale: forti pendenze, curve strette, sagoma limite ridotta, rete tramviaria urbana, ponti, e altro. Si ha quindi a disposizione una varietà di macchinari che permettono di operare in tutte le situazioni.

Il principale costituente di questi macchinari è la mola, attrezzo rotante che permette l'asportazione di materiale dalla rotaia in modo altamente mirato e preciso. I macchinari di cui si è parlato sono composti da più carri, 3 nel caso dell' RR24 o 4 nel caso dell' RR32, ognuno dei quali monta 4 mole disposte in serie per ogni binario. Grazie a motori inclinabili che permettono di orientarle

con alta precisione rispetto all'angolazione del binario, queste sono in grado di realizzare lavorazioni ad altissima precisione, grazie anche a regolatori di pressione ad alta precisione, che le consentono di esercitare sul binario la giusta pressione, perché se questa è troppo bassa si ottiene solamente una lucidatura del binario, mentre se è troppo alta si rovina il profilo asportando troppo materiale. Altro parametro importante è la velocità di lavoro, perché se questa è troppo bassa si ha un eccessivo riscaldamento, sia del binario, sia della mola, mentre se è troppo elevata si può intaccare la precisione della lavorazione. Al fine di mantenere questi parametri su livelli ottimali le macchine sono comandate da un sistema computerizzato che comanda le mole tutte insieme, evitando anche che queste possano venire a contatto con qualunque ostacolo presente in linea. Dei monitor presenti in cabina di pilotaggio consentono agli operatori di comandare le operazioni, controllare costantemente l'operato delle mole, attività fondamentale nei confronti del risultato finale, e documentano il loro operato in verbali di misura, che consentono di verificare il rispetto dei valori di collaudo concordati con il committente.

I treni molatori sono forniti anche di apparati per l'aspirazione delle polveri generate dall'abrasione delle rotaie e di apparecchi che depurano i gas prodotti dalle lavorazioni, questi ultimi sono un requisito strettamente necessario affinché il macchinario possa operare in galleria. Inoltre essendo anche molto silenziosi la loro operatività è completa anche durante le ore notturne.

Per quanto concerne gli scambi, i problemi che presentano i binari sono analoghi a quelli caratteristici del resto della linea, tuttavia la presenza di aghi e controrotaie cambia leggermente il modo di operare dei macchinari. Si costituiscono quindi dei macchinari appositamente realizzati, di dimensioni inferiori, che possono essere impiegati anche dove è necessario utilizzare macchinari di dimensioni ridotte, oppure in corrispondenza di manufatti con caratteristiche della linea particolari, come i ponti ad esempio.

Al fine di garantire la bontà del risultato finale e contenere il più possibile i costi è fondamentale acquisire informazioni sullo stato di fatto della rotaia sia prima di iniziare, sia durante la lavorazione in modo da poter scegliere il treno molatore più adatto alla situazione. Nella fase di acquisizione dati le informazioni sui profili delle due rotaie componenti il binario vengono misurate in contemporanea a mezzo di un carrello di misura, come ad esempio il

modello SM775 elaborato dalla Speno Spa, che opera senza conducente. Tale mezzo effettua misurazioni del profilo sia longitudinali, sia trasversali. Le prime avvengono con contatto diretto per mezzo di due accelerometri, che con l'ausilio di due trasduttori permettono di rilevare le lunghezze d'onda e le profondità dei difetti. Il profilo trasversale invece viene misurato per mezzo di raggi laser ad alta precisione, che confrontando il profilo standard della rotaia esaminata con quello in analisi ne rilevano i difetti. Il macchinario effettua una misurazione ogni 15 cm con una precisione di 0,05 mm a velocità di 80 km/h. I dati vengono mantenuti separati per i due binari e sono registrati sia elettronicamente, sia su carta in continuo, in tabelle secondo un criterio precedentemente scelto, come ad esempio il tratto di binario o la frequenza del difetto. Sono disponibili inoltre tutte le informazioni necessarie per pianificare al meglio gli interventi, come: lunghezza delle onde, profondità media e massima, tratto, particolarità ecc.

La misurazione elettronica può anche essere integrata da quella manuale, soprattutto nelle sezioni di maggiore interesse e rilevanza, come in presenza di difetti isolati, negli scambi ferroviari, oppure dove non siano eseguibili rilievi automatici.

Come anticipato anche il controllo durante la lavorazione è un elemento chiave di un lavoro ben riuscito, per questo motivo tutti i treni molatori sono equipaggiati di mezzi di rilievo analoghi a quelli installati sull'SM775, in modo da effettuare anche delle misurazioni utili in fase di collaudo.

L'operazione di molatura viene utilizzata anche per modificare i profili delle rotaie a prevenzione dei fenomeni di usura in curva, conseguenza diretta della differente percorrenza di spazio presente tra le due ruote e della rigidità dell'assale. Dando alle rotaie un profilo asimmetrico si può migliorare sensibilmente la superficie di contatto ruota – bordino. Sulla rotaia esterna si agisce asportando parte del materiale presente sull'esterno della rotaia in modo che la ruota poggi con la sua parte più vicina al bordino, mentre sulla rotaia interna si fa l'esatto opposto in modo che la ruota poggi sul suo diametro minore.

6.2. Strategie di molatura

La strategia di molatura migliore è da decidere in funzione di vari parametri e i maggiormente considerati sono: condizioni attuali delle rotaie, loro età, tipo e quantità di traffico da cui è interessata la linea. Solo una volta scelta la strategia con cui operare è possibile definire la pianificazione degli interventi, per la quale è necessario conoscere anche il numero di rotaie da lavorare, la loro locazione e la tecnica con cui questo deve essere fatto. È necessaria pertanto una fase preliminare di acquisizione dei dati sullo stato reale attuale della linea, atto a individuare anche l'ordine di priorità con cui devono essere effettuati gli interventi. La pianificazione deve tener conto anche del momento in cui realizzare le lavorazioni e dato che il tempo disponibile è in continua diminuzione si dovrebbe sempre essere operativamente pronti a sfruttare occasioni di lavoro ottimali conseguenti ad esempio a imprevisti sulla linea.

Le strategie che si possono individuare sono le seguenti:

- molatura iniziale: interessa le rotaie appena installate ed è finalizzata alla rimozione della pellicola di laminazione e della microrugosità. Questo permette di ritardare l'inizio dell'usura ondulatoria e di preparare al meglio la superficie di rotolamento all'esercizio
- molatura preventiva: solitamente si realizza attraverso un unico passaggio ed è finalizzata alla conservazioni in buono stato della rotaia per la prevenzione dell'insorgere di qualsiasi fenomeno di degrado. Deve essere attentamente pianificata
- molatura ciclica: viene pianificata basandosi sul tonnellaggio passante sulla linea considerata e permette di prevenire l'insorgere di vibrazioni e fenomeni di fatica, inoltre si ha un ritorno anche nella riduzione dell'inquinamento acustico
- molatura sintomatica: monitorando costantemente la linea si individuano quei difetti giunti ai massimi livelli tollerabili sia per le loro caratteristiche geometriche, sia per le loro ripercussioni sul rumore generato in esercizio. Si procede quindi alla molatura ristabilendo il profilo geometrico voluto
- molatura correttiva: si realizza laddove insorgono improvvisamente dei difetti, è il tipico caso di: danni isolati da fatica, sbavature e ondulazioni

Come si può notare da quanto sopra esistono diverse tecniche attuabili.

Tenendo conto che più tardi si elimina un difetto e maggiori saranno i costi

derivati per la sua riparazione, per poter avere un risparmio a lungo termine è preferibile attuare una politica manutentiva preventiva costante e puntuale, piuttosto che realizzare interventi correttivi al manifestarsi dei difetti.

6.3. Vantaggi economici

Numerosi studi condotti su rotaie sottoposte a manutenzione sistematica con molatura hanno evidenziato i seguenti vantaggi: un notevole prolungamento della vita utile di queste, fino a raggiungere anche il 100% in più, di conseguenza una minore necessità di cambiare l'armamento con risparmio sia in termini di denaro, che di tempo. Una riduzione dei lavori di manutenzione dei binari, come ad esempio un minore deterioramento degli attacchi e della necessità di rinalzatura, quindi un abbassamento dei costi di gestione. Un contenimento delle vibrazioni sia meccaniche, sia acustiche e questo si traduce in un maggiore comfort di marcia per i passeggeri e un minore disturbo per i residenti vicini alle ferrovie. Si hanno dei vantaggi anche per quanto concerne i costi di trazione e i cicli di tornitura delle ruota, soprattutto per il traffico pesante.

I risparmi ottenuti sono rilevanti e vengono prevenute situazioni pericolose. Si ottengono benefici anche sul materiale rotabile, che interagendo con un binario in condizioni non ottimali si deteriorerebbe più velocemente, oppure potrebbe dare luogo a restrizioni sulle velocità massime con ripercussioni economiche sull'intera linea.

La stima dei costi va effettuata a partire da dati sulla progressione dei difetti superficiali, ognuno dei quali ha gravità, velocità di propagazione e dimensioni diverse, quindi costi diversi. I dati permettono di stimare con buona approssimazione i costi totali, che sono suddivisi tra quelli necessari per le riparazioni e quelli per i danni. I costi per le riparazioni vengono calcolati tenendo in considerazione le spese per la lavorazione, i costi del personale e quelli derivanti dall'occupazione della linea. Il discorso è diverso per i danni, intesi come conseguenze di guasti, perché possono avere delle conseguenze difficili da stimare a priori. Il risultato cui si mira è sempre la minimizzazione dei costi e per conseguire tale traguardo devono essere attentamente analizzate le condizioni al contorno in cui opera la linea considerata. In generale si può dire che una manutenzione puntuale e costante porta a un risparmio a lungo termine, aumentando la redditività degli investimenti, il grado di utilizzazione dei mezzi e della linea e il risparmio per le spese di esercizio.

7. Conclusioni

Il lavoro svolto ha messo in luce il processo di formazione della rotaia e gli inconvenienti cui può andare incontro una lavorazione non adeguatamente attenta e controllata. L'insieme delle fasi che si avvicendano per portare al prodotto finito sono il risultato di secoli di esperienza e sperimentazione mirata ad ottenere un prodotto sempre più performante e affidabile. Oggigiorno si è in possesso di tutti gli strumenti necessari per realizzare delle rotaie che possano rispondere in modo efficace a specifiche condizioni d'esercizio diverse, sia per quanto concerne l'ambiente d'esercizio, sia i carichi da traffico, pertanto risulta fondamentale agire per mettere a punto un prodotto finito che sia affidabile, durevole, tenace e resistente.

L'esercizio ferroviario, molto particolare nel suo essere, non può permettersi alcun tipo di incidente, innanzitutto per motivi di sicurezza, ma anche perché questo significherebbe la perdita di produttività di un'intera linea, senza contare che tali eventi possono compromettere anche la circolazione sui binari vicini. La rotaia, avendo la funzione di guida e sostentamento dei mezzi, svolge un ruolo fondamentale nell'esercizio, che la sollecita ciclicamente mettendone alla prova le proprietà meccaniche e fisiche. Per questo motivo il controllo della produzione è solo il primo passo da compiere per poter assicurare un esercizio sicuro e sempre efficiente, perché questo può essere garantito solamente attraverso un monitoraggio costante e puntiglioso finalizzato a una prevenzione completa e integrale. A tale proposito si è visto come il "Catalogo dei difetti" sia uno strumento molto utile e preciso nell'individuazione degli ammaloramenti e nella prescrizione per le loro cure.

In un contesto come quello odierno, in cui la sostenibilità ambientale è un'esigenza sempre più a cuore dell'individuo, la ferrovia ha il compito di attrarre utenza per poter ridurre il più possibile il traffico stradale, soprattutto nei collegamenti tra le periferie e le città. A tale fine è fondamentale che tutte le funzioni a regola d'arte, pertanto tutto va curato nei minimi dettagli sia durante la progettazione, sia durante tutta la sua vita utile.

8. Bibliografia

- ❖ “Metallurgia, principi generali” di Walter Nicodemi (2007), Zanichelli
- ❖ “Struttura e proprietà meccaniche dei materiali meccanici” vol.1 di Pietro Brozzo (1975), e.c.i.g
- ❖ “Acciai e leghe non ferrose” di Walter Nicodemi (2008), Zanichelli
- ❖ “Constitution and properties of steels” vol.7 di F.B. Pickering (2010)
- ❖ “Railway applications – Track – Rail – part 1: Vignole Railway rails 46 kg/m and above” (2002), NORMA UNI prEN 13674-1
- ❖ “Rail defects” (2002), UIC 712
- ❖ “Fabbricazione materiali di armamento, saldature – apporti di metallo, tempera delle rotaie” (1963), Roma, Scuola centrale di istruzione professionale
- ❖ “Rotaie e barre per aghi” (2004), RFI TCAR SP AR 02 001 A
- ❖ “Materiali metallici – Prova di trazione – parte 1” NORMA UNI EN 10002 – 1:2004
- ❖ “Condizioni di fornitura relative alla finitura superficiale di lamiera, larghi piatti e profilati di acciaio laminato a caldo” NORMA UNI EN 10163-1:2005
- ❖ “Sistemi di gestione per la qualità: requisiti” NORMA UNI EN ISO 9001 (2008)
- ❖ “Kit completo per sistemi di saldatura alluminotermica” specifica RFI TCAR SF AR 07 005 B
- ❖ “Standard Test Method for Linear–Elastic Plane–Strain Fracture Toughness K_{1c} of metallic materials” ASTM E399
- ❖ www.speno.org
- ❖ www.industrialeweb.com/industria-metallurgica
- ❖ www.chimicamo.org
- ❖ www.ispatguru.com