



POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

## **FAILURE ANALYSIS DI UN CUSCINETTO VOLVENTE**

Relatore: Prof. Marco BONIARDI

Correlatore: Dott. Ing. Silvia BARELLA

Tesi di Laurea di:

Stefano BORRONI

Matr. 725103

Anno Accademico 2009/2010

# Indice

Indice .....	2
Indice delle figure e delle tabelle .....	4
1 I cuscinetti .....	13
1.1 Definizione di cuscinetto .....	13
1.2 Cuscinetto radente.....	13
1.2.1 Materiali per bronzine .....	14
1.2.2 Caratteristiche costruttive delle bronzine.....	15
1.3 Cuscinetti a rotolamento .....	16
1.3.1 Classificazione dei cuscinetti a rotolamento.....	17
1.3.2 Cenni sul montaggio dei cuscinetti a rotolamento .....	18
1.3.3 Danneggiamento dei cuscinetti a rotolamento .....	20
1.3.4 Tipologie di guasto sui cuscinetti a rotolamento .....	22
1.3.4.1 Flaking .....	22
1.3.4.2 Peeling.....	24
1.3.4.3 Spalling .....	25
1.3.4.4 Smearing .....	27
1.3.4.5 Usura .....	29
1.3.4.6 Fretting wear - Fretting corrosion.....	31
1.3.4.7 Denting - Indentation .....	33
1.3.4.8 Speckles - Discoloration .....	35
1.3.4.9 Grippaggio .....	37
1.3.4.10 Corrosione.....	39
1.3.4.11 Cricche e Rotture .....	41
1.3.4.12 Electrical pitting e Flutting .....	43
1.4 Il fenomeno della flaking failure .....	45
1.4.1 Influenza della rugosità .....	58
1.4.2 Influenza della durezza.....	61

1.4.3	Influenza della forza tangenziale.....	63
1.4.3.1	Influenza della direzione della forza tangenziale .....	66
1.4.4	Influenza del lubrificante .....	69
2	Procedura sperimentale .....	73
2.1	Caratterizzazione metallografica .....	73
2.1.1	Esame della microstruttura.....	73
2.1.2	Preparazione dei campioni .....	73
2.1.2.1	Procedura .....	74
2.1.3	Spianatura.....	74
2.1.3.1	Procedura .....	74
2.1.4	Lucidatura.....	75
2.1.4.1	Procedura .....	75
2.1.5	Attacco chimico.....	75
2.1.6	SEM.....	76
2.1.7	Microdurezza Vickers .....	78
3	Failure analysis.....	80
3.1	Il Problema.....	80
3.1.1	Campioni analizzati.....	81
3.2	Risultati e discussione.....	82
3.2.1	Esame visivo.....	82
3.2.2	Analisi del danneggiamento (mediante SEM) .....	84
3.2.3	Analisi metallografica .....	102
3.2.4	Test di microdurezza .....	109
3.2.5	Analisi chimica.....	110
3.2.6	Analisi degli sforzi residui .....	111
3.3	Fenomeno del flaking .....	112
4	Conclusioni.....	116
	Bibliografia.....	118
	Webgrafia .....	121

## Indice delle figure e delle tabelle

Figura 1.1: Bronzine.....	15
Figura 1.2: Bronzina con fori per la raccolta del lubrificante.....	16
Figura 1.3: Cuscinetto radiale orientabile a due corone di rulli.....	16
Figura 1.4: Cuscinetto ibrido di NKE con corpi volventi in ceramica. ....	19
Figura 1.5: Cuscinetto a rulli conici di NKE. ....	19
Figura 1.6: Cuscinetti volventi speciali per turbocompressori di forma complessa. La soluzione adottata dalla SKF si basa su un cuscinetto obliquo ad una corona di sfere in ceramica.....	19
Figura 1.7: Cuscinetto a sfere. Il flaking si manifesta sull’anello interno l’anello esterno e le sfere a causa del carico eccessivo.....	23
Figura 1.8: Cuscinetto a sfere. Flaking dell’anello interno a causa di un carico assiale eccessivo.....	23
Figura 1.9: Cuscinetto a sfere. Flaking solo da un lato dell’anello interno a causa carico assiale eccessivo. ....	23
Figura 1.10: Cuscinetto a sfere. Flaking di un quarto della pista dell’anello esterno per via di una installazione errata del cuscinetto.....	23
Figura 1.11: Rulli a botte. Peeling tondeggiante sui rulli a botte del cuscinetto per via di una scarsa lubrificazione.....	24
Figura 1.12: Cuscinetto a rulli conici. Peeling presente sia sull’anello interno che sui rulli conici per via di una scarsa lubrificazione. ....	24
Figura 1.13: Cuscinetto a rulli cilindrici. Spalling dell’orlo per un carico eccessivo.....	25
Figura 1.14: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Spalling della superficie della pista di rotolamento per una scarsa lubrificazione. ....	25
Figura 1.15: Rulli di un cuscinetto a rulli conici. Spalling circolare sulla faccia dei rulli per via di una cattiva lubrificazione. ....	26

Figura 1.16: Rulli di un cuscinetto a rulli cilindrici. Spalling, in direzione assiale, della superficie del rullo causata durante il montaggio del cuscinetto. 26

Figura 1.17: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Lo smearing sulla superficie della pista è causata dalla presenza di detriti, intrappolati tra i rulli, che provocano lo slittamento dei rulli. .... 28

Figura 1.18: Rullo cilindrico del cuscinetto mostrato in Fig 1.17. Lo smearing sulla superficie del rullo è causata dalla presenza di detriti, intrappolati tra i rulli, che provocano lo slittamento dei rulli. .... 28

Figura 1.19: Anello esterno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Segni di usura sulla superficie della pista di rotolamento a causa di una scarsa lubrificazione. .... 29

Figura 1.20: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Lungo tutta la circonferenza sono evidenti segni di usura della pista di rotolamento, a causa di una scarsa lubrificazione. .... 30

Figura 1.21: Gabbia di un cuscinetto a rulli cilindrici. Usura da abrasione della gabbia in ottone. .... 30

Figura 1.22: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. A causa delle vibrazioni, su tutta la superficie della pista di rotolamento è presente fretting wear. .... 31

Figura 1.23: Anello interno di un cuscinetto a sfere. A causa delle vibrazioni, su tutta la superficie della pista di rotolamento è presente fretting wear. .... 32

Figura 1.24: Anello esterno di un cuscinetto a rulli cilindrici. In corrispondenza del diametro esterno dell'anello, tutta la superficie presenta fretting corrosion. .... 32

Figura 1.25: Anello esterno di un cuscinetto a rulli conici. In corrispondenza del diametro esterno dell'anello, tutta la superficie presenta fretting corrosion. .... 32

Figura 1.26: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Le indentazioni sono presenti su un solo lato della pista a causa della presenza di corpi solidi interposti tra i rulli e la pista di rotolamento.....	34
Figura 1.27: Rulli a botte di un cuscinetto a rulli. Le indentazioni sono presenti sulla superficie di contatto dei rulli a botte a causa della presenza di corpi solidi interposti tra i rulli e la pista di rotolamento.....	34
Figura 1.28: Rulli conici di un cuscinetto a rulli. Le indentazioni sono su tutta la superficie di contatto dei rulli conici a causa di corpi solidi presenti all'interno del lubrificante.....	34
Figura 1.29: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. Le indentazioni sono visibili sulla superficie della pista, sono causate della presenza di corpi solidi interposti tra i rulli conici e la pista di rotolamento. ....	34
Figura 1.30: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. La superficie è macchiata a causa del pitting elettrico. ....	35
Figura 1.31: Sfera di un cuscinetto a sfere. Le macchie sono ovunque, sono causate da una scarsa lubrificazione e dalla presenza di corpi solidi interposti tra le sfere e la pista di rotolamento. ....	35
Figura 1.32: Anello esterno di un cuscinetto a rulli a botte. Parziale deposizione di olio sulla superficie della guida. ....	36
Figura 1.33: Anello interno ed esterno di un cuscinetto a rulli a botte. La perdita di colore della superficie, della pista dell'anello interno ed esterno, è causata dalla deterioramento del lubrificante.....	36
Figura 1.34: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici a doppia fila. La causa del grippaggio è una scarsa lubrificazione.....	37
Figura 1.35: Rulli conici appartenenti all'anello interno mostrato in figura 1.34. A causa del grippaggio, i rulli hanno subito una perdita di colore, una scheggiatura e una adesione.....	37
Figura 1.36: Anello esterno di un cuscinetto a rulli a botte. Il grippaggio è dovuto ad una scarsa lubrificazione. ....	38

Figura 1.37: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. Grippaggio avvenuto per carico eccessivo e lubrificazione inadeguata. ....	38
Figura 1.38: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. Corrosione della pista di rotolamento a causa della presenza di acqua nel lubrificante. ....	39
Figura 1.39: Anello esterno di un cuscinetto a rulli conici. Corrosione della pista di rotolamento a causa della presenza di acqua nel lubrificante .....	39
Figura 1.40: Rullo a botte. Corrosione della superficie di contatto del rullo a causa dell'ingresso di acqua nel cuscinetto.....	40
Figura 1.41: Anello interno di un cuscinetto a rulli. Corrosione della pista di rotolamento a causa della presenza di acqua nel lubrificante. ....	40
Figura 1.42: Anello interno di un cuscinetto a rulli a botte. La rottura è causata da una eccessiva interferenza, il punto di origine della cricca si osserva nel mezzo della superficie della pista di sinistra.....	41
Figura 1.43: Anello esterno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Suddivisione, in direzione circonferenziale, della pista di rotolamento a causa di un elevato sfaldamento. ....	42
Figura 1.44: Anello esterno di un cuscinetto a sfere a contatto obliquo. Suddivisione della superficie della pista in direzione circonferenziale a causa dello slittamento della sfere e della scarsa lubrificazione.....	42
Figura 1.45: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. La superficie della pista risulta ondulata a causa del pitting elettrico. ....	43
Figura 1.46: Rulli conici. Il pitting elettrico si verifica nel mezzo della superficie di contatto dei rulli. ....	44
Figura 1.47: Ingrandimento del pitting elettrico relativo ai rulli di figura 1.46. ....	44
Figura 1.48: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. Le scanalature sulla superficie della pista sono causate dalla corrosione elettrica “flutting”. ....	44
Figura 1.49: Mostra l'esempio di una flaking failure, accompagnata da cricche iniziate sul bordo di uscita di una indentazione, e che si estendono nella	

direzione di movimento del carico: (a) vista dall'alto della flaking failure in prossimità della indentazione; (b) sezione trasversale lungo la linea A-A mostrata in figura (a).....	47
Figura 1.50: Schema che rappresenta il doppio rullo utilizzato per il test di fatica. ....	48
Figura 1.51: Movimento della indentazione all'interno della superficie di contatto.....	49
Figura 1.52: Vista dall'alto e sezione trasversale di una flaking failure osservata sulla superficie del piccolo rullo priva di difetti, la rottura è accompagnata da cricche estese in due direzioni rispetto alla direzione di movimento del carico . ....	49
Figura 1.53: (a) Vista dall'alto e sezione trasversale di una piccola flaking failure, (b) vista dall'alto e sezione trasversale di una grande flaking failure. ....	50
Figura 1.54: Micro cricche al di sotto della superficie e parallele alla superficie di contatto.....	51
Figura 1.55: Processo di formazione delle cricche bidirezionali nella flaking failure.....	52
Figura 1.56: Processo della flaking failure accompagnata da cricche OLM e LM.....	54
Figura 1.57: (a) Carico statico di compressione, (b) momento flettente statico. ....	54
Figura 1.58: Andamento della pressione di contatto quando, l'indentazione sulla superficie di accoppiamento, si muove attraverso l'area di contatto. ....	55
Figura 1.59: Possibile meccanismo di formazione della flaking failure accompagnato da una cricca OLM.....	56
Figura 1.60: Sezioni trasversali di una piccola flaking failure osservata sulla superficie del piccolo rullo.....	56
Figura 1.61: Una tipica flaking failure accompagnata da cricche LM e OLM. ....	57



Figura 1.62: Influenza della rugosità superficiale, degli elementi che rotolano, sulla indentazione che da origine alla flaking failure. ....	59
Figura 1.63: Indentazione che da inizio allo sfaldamento. ....	59
Tabella 1.1: Caratteristiche delle superfici dei cuscinetti utilizzate nei test a fatica. ....	60
Figura 1.64: Azione degli sforzi sui bordi dell’ammaccatura.....	63
Figura 1.65: Andamento del ciclo di tensione-compressione in direzione.....	64
Figura 1.66: Posizione di partenza della cricca quando l’ammaccatura è presente sul componente che è condotto.....	65
Figura 1.67: Posizione di partenza della cricca quando l’ammaccatura è presente sul componente che conduce. ....	65
Tabella 1.2: Modalità dei test.....	67
Figura 1.68: Influenza, dell’inversione di rotazione, sulla ammaccatura che da origine alla flaking failure.....	68
Figura 2.1: Microscopio elettronico a scansione .....	77
Figura 2.2 Penetratore a forma di piramide, diagonali lasciate dell’impronta. ....	78
Figura 3.1: Primo campione e secondo campione del sistema di trazione. ....	81
Figura 3.2: Secondo campione.....	81
Figura 3.3: Sono indicate la pista lato motore e lato ingranaggio del cuscinetto. ....	82
Figura 3.4: Distanza tra i due danni principali individuati sulla pista “GS”. ...	82
Figura 3.5: Difetti secondari individuati lontano dai danni principali.....	83
Figura 3.6: Primo danno principale sulla pista “GS” .....	84
Figura 3.7: Direzione di rotolamento. ....	84
Figura 3.8: Asportazione di detriti in direzione normale alla direzione di rotolamento.....	85
Figura 3.9: (1) Cricche circolari, (2) piccoli buchi. ....	85
Figura 3.10: Secondo danno principale sulla pista “GS” .....	86

Figura 3.11: Asportazione di detriti in direzione normale alla direzione di rotolamento.....	86
Figura 3.12: Cricche e piccoli buchi presenti al di sopra del danno principale.	87
Figura 3.13: Cricche presenti al di sotto del danno principale. ....	87
Figura 3.14: Piccoli difetti lontani dai danni principali. ....	88
Figura 3.15: Piccoli difetti lontani dai danni principali. ....	88
Figura 3.16: Piccoli difetti lontani dai danni principali. ....	88
Figura 3.17: Piccoli difetti lontani dai danni principali. ....	89
Figura 3.18: Rientranze individuate sulla pista del cuscinetto. ....	89
Figura 3.19: Piccoli difetti della pista “MS” lontani dai danni principali. ....	90
Figura 3.20: Piccoli difetti della pista “MS” lontani dai danni principali. ....	90
Figura 3.21: Piccoli difetti della pista “MS” lontani dai danni principali. ....	91
Figura 3.22: Sezione trasversale in corrispondenza del danno macroscopico più piccolo. ....	92
Figura 3.23: Cricche in ingresso dell’indentazione sviluppatasi al di sotto della superficie. ....	92
Figura 3.24: Cricche in uscita dell’indentazione sviluppatasi al di sotto della superficie. ....	93
Figura 3.25: Sezione longitudinale in corrispondenza del danno macroscopico più grande. ....	93
Figura 3.26: Micrografia, ottenuta tramite l’analisi al SEM, della sezione longitudinale del danno più grande. ....	93
Figura 3.27: Micrografia, ottenuta tramite l’analisi al QSBD, della sezione longitudinale del danno più grande. ....	94
Figura 3.28: Propagazione delle cricche al di sotto della superficie in corrispondenza del bordo d’ingresso. ....	94
Figura 3.29: Propagazione delle cricche al di sotto della superficie in corrispondenza del bordo d’uscita lato “B”. ....	95

Figura 3.30: Propagazione delle cricche al di sotto della superficie in corrispondenza del bordo d'uscita lato "B".	95
Figura 3.31: Sezione longitudinale della pista "GS" distante dal danno macroscopico più grande.	96
Figura 3.32: Cricche ossidate messe in evidenza attraverso una sezione longitudinale della pista "GS".	96
Figura 3.33: Presenza di ossido nelle cricche.	96
Figura 3.34: Cricca comparsa al di sotto della superficie della pista "GS".	97
Figura 3.35: Morfologia dei danni appartenenti alla superficie della pista "GS".	97
Figura 3.36: Morfologia dei danni appartenenti alla superficie della pista "GS".	98
Figura 3.37: Sezione longitudinale della pista "MS" distante dal danno macroscopico più grande.	99
Figura 3.38: Morfologia dei danni appartenenti alla superficie della pista "MS".	99
Figura 3.39: Piccoli difetti individuati sulla superficie delle sfere.	100
Figura 3.40: Piccoli difetti individuati sulla superficie delle sfere.	100
Figura 3.41: Ingrandimento dello strato superficiale indurito.	102
Figura 3.42: Ingrandimento dello strato superficiale indurito.	102
Figura 3.43: Interfaccia tra lo strato indurito e il restante materiale.	103
Figura 3.44: Martensite temprata.	103
Figura 3.45: Sezione trasversale del danno principale.	104
Figura 3.46: Microstruttura perpendicolare alla pista "GS".	104
Figura 3.47: Ingrandimento dello strato superficiale indurito.	105
Figura 3.48: Interfaccia tra lo strato indurito e il restante materiale.	105
Figura 3.49: Sezione longitudinale del danno principale.	106
Figura 3.50: Microstruttura parallela alla pista "GS".	106
Figura 3.51: Concentrazione di solfuri di manganese.	107

Figura 3.52: Ingrandimento strato superficiale indurito. ....	107
Figura 3.53: Interfaccia tra lo strato indurito e il restante materiale.....	108
Figura 3.54: Cricca presente al di sotto della superficie di rotolamento della pista “GS”. La cricca è lunga circa 1 mm. ....	108
Figura 3.55: Profilo della microdurezza ottenuto dopo il test. ....	109
Tabella 3.1: Analisi chimica del cuscinetto. ....	110
Figura 3.56: Direzioni principali degli sforzi.....	111
Figura 3.57: Azione degli sforzi sui bordi dell’ammaccatura.....	113
Figura 3.58: Andamento del ciclo di tensione-compressione.....	114

# 1 I cuscinetti

## 1.1 Definizione di cuscinetto

Prende il nome di cuscinetto l'elemento destinato a ricevere e sopportare un albero rotante.

Possiamo distinguere due categorie di cuscinetti: ad **attrito radente**, detti comunemente bronzine, nei quali si ha un contatto di strisciamento fra la superficie del cuscinetto e quella dell'albero (contatto che può essere diretto oppure mediato dalla interposizione di un velo di lubrificante), e quelli ad **attrito volvente**, detti a rotolamento, nei quali fra albero e sede vengono interposti dei corpi volventi (sfere, rulli e rullini) in modo da diminuire l'attrito trasformandolo da radente in volvente.

A seconda della direzione del carico, si possono ancora distinguere in cuscinetti portanti o radiali nei quali la direzione del carico è perpendicolare all'asse di rotazione dell'albero, cuscinetti a spinta o assiali nei quali la direzione del carico è diretta lungo l'asse di rotazione dell'albero, e misti o obliqui (direzione del carico inclinata rispetto all'asse di rotazione).

## 1.2 Cuscinetto radente

Il cuscinetto radente o bronzina è costituito da un elemento cilindrico cavo, serrato entro il foro di un elemento detto supporto, nel quale va ad inserirsi l'albero rotante.

Il diametro del foro della bronzina è leggermente maggiore (decimi di millimetro e anche meno) del diametro dell'albero per permettere l'introduzione e il mantenimento di un certo velo di lubrificante, destinato a sopportare il carico applicato impedendo il contatto diretto tra albero e cuscinetto e quindi un veloce deterioramento di quest'ultimo.

Il lubrificante viene inserito nei cuscinetti tramite oliatori o ingrassatori nel caso di lubrificazione naturale, oppure in pressione nel suddetto meato tra albero e cuscinetto nel caso di lubrificazione forzata.

### **1.2.1 Materiali per bronzine**

I materiali usati per la realizzazione delle bronzine devono avere certe caratteristiche, le più importanti sono:

- basso coefficiente di attrito, in modo da ridurre al minimo la potenza dissipata e quindi il calore generato dall'accoppiamento;
- elevata resistenza meccanica e resistenza a fatica, per poter sopportare le elevate sollecitazioni;
- buona durezza superficiale, la quale però deve essere inferiore a quella dell'albero affinché l'usura dell'accoppiamento sia concentrata sulla bronzina, di facile ed economica sostituzione;
- costanza delle caratteristiche meccaniche con il variare della temperatura;
- resistenza alla corrosione in ambiente acido (come quello dovuto alla presenza di lubrificante);
- elevata conducibilità termica per poter smaltire al meglio il calore generato.

Fra i materiali più usati abbiamo la ghisa perlitica (contenente carbonio sotto forma di grafite fine), i bronzi allo stagno, allo zinco e al piombo (da cui il nome bronzine) e le leghe antifrizione, costituite da metalli bianchi che possono essere a base di stagno e piombo o a base di stagno e zinco.

Esistono anche dei cuscinetti autolubrificanti in materiale sinterizzato con base di polveri metalliche, gli spazi fra un grano e l'altro vengono riempiti di grasso che si scioglie sotto l'effetto del calore sviluppato durante il funzionamento provvedendo a lubrificare il tutto; quando velocità e calore diminuiscono, parte

del grasso viene riassorbito grazie alla capillarità dei pori del cuscinetto. Si ha così una specie di regolazione automatica della lubrificazione.

### **1.2.2 Caratteristiche costruttive delle bronzine**

Le bronzine possono essere costituite in un solo pezzo successivamente forzato nella sede del supporto oppure in due metà, due gusci, in modo da rendere possibile il loro montaggio anche in parti non accessibili con bronzine in un solo pezzo, come ad esempio le bronzine di biella degli alberi a gomito.

Le bronzine possono essere costituite unicamente da uno dei materiali citati oppure, più frequentemente, sono costituite da una bussola di un altro materiale (tipo acciaio) rivestita di metallo anti frizione fuso e colato nel cuscinetto. Per favorire l'aderenza di questo rivestimento, la bussola è dotata di scanalature con forma a coda di rondine.

Per trattenere il lubrificante nel cuscinetto e consentirne una distribuzione quanto più possibile uniforme in tutti i punti, le bronzine sono spesso dotate di scanalature di varia forma. Di solito si tratta di scanalature che tendono a distribuire il lubrificante in tutta la lunghezza dell'accoppiamento e a convogliare verso il centro quello che fluirebbe all'esterno.

E' necessario che queste scanalature siano studiate in modo particolare perché altrimenti il loro effetto potrebbe diventare dannoso: è necessario in particolare che la metà della bronzina che viene caricata non abbia scanalature che portino di fatto ad una diminuzione della capacità di carico.



**Figura 1.1: Bronzine.**



Figura 1.2: Bronzina con fori per la raccolta del lubrificante.

### 1.3 Cuscinetti a rotolamento

I cuscinetti a rotolamento sono nati con lo scopo di diminuire l'attrito, fra albero (oppure perno) e supporto, trasformandolo in attrito volvente, assai inferiore a quello radente con una lubrificazione minore di circa dieci volte.

Un cuscinetto a rotolamento è costituito in generale dalle seguenti parti:

- un anello interno che viene montato sull'albero;
- un anello esterno che viene montato nel supporto;
- una serie di corpi volventi che possono essere sfere, rulli e rullini, rotolanti in apposite piste ricavate negli anelli (cementate e rettificatae per ridurre gli attriti e aumentare la resistenza all'usura) e tenuti assieme ad opportuna distanza da una gabbia di stanziatrice.

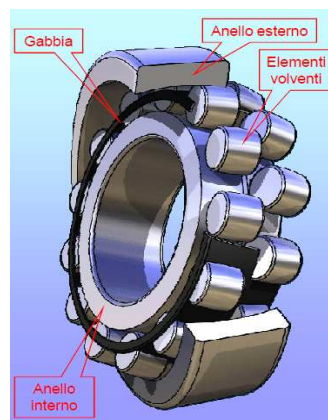


Figura 1.3: Cuscinetto radiale orientabile a due corone di rulli.



I vantaggi principali che i cuscinetti volventi garantiscono rispetto alle bronzine sono:

- minore coefficiente di attrito (dovuto alla nota trasformazione dell'attrito da radente in volvente);
- facilità di avviamento anche in condizioni di scarsa lubrificazione dovuta al fatto che il coefficiente di attrito si mantiene costante al variare di regime;
- economia di lubrificante, in quanto nei cuscinetti volventi il lubrificante ha il solo scopo di ridurre i piccoli attriti tra corpi volventi e gabbia distanziatrice e l'attrito dovuto alla deformabilità dei corpi volventi e degli anelli nei punti di contatto;
- spese di manutenzioni minori;
- minori temperature nei supporti dovute al minore attrito.

Gli svantaggi principali rispetto alle bronzine, sono:

- maggiore ingombro;
- impossibilità di una esecuzione in due metà e quindi mancato uso con alberi di forma particolare quali alberi a gomito in un sol pezzo.

### **1.3.1 Classificazione dei cuscinetti a rotolamento**

In base alla forma dei corpi volventi si hanno cuscinetti a sfere, a rulli conici, a rulli a botte e a rullini.

A seconda del numero di corone di corpi volventi si hanno cuscinetti ad una o a due corone di sfere o rulli

A seconda della direzione del carico che devono sopportare, come si è già riportato in precedenza, si distinguono i cuscinetti **radiali**, **assiali** e **misti**.

Si hanno infine cuscinetti rigidi se gli assi degli anelli sono coincidenti e i cuscinetti orientabili se i due assi possono orientarsi tra loro in posizioni diverse, mantenendo fisso un punto comune che è chiamato centro del cuscinetto.

### **1.3.2 Cenni sul montaggio dei cuscinetti a rotolamento**

I cuscinetti a rotolamento vengono costruiti con superfici accuratamente rettificate.

I cuscinetti a rotolamento radiali vengono costruiti con un certo gioco interno per lasciare ai corpi volventi una certa libertà fra gli anelli in modo da compensare automaticamente lievi dilatazioni o contrazioni degli anelli stessi per forzamento in fase di montaggio.

Nelle applicazioni di questi cuscinetti devono essere tenute presenti alcune norme di montaggio, la cui inosservanza può causare la rottura del cuscinetto stesso molto rapidamente.

Una prima regola da seguire è quella di non montare mai cuscinetti radiali rigidi quando non si ha la certezza della perfetta coassialità dei supporti, né tantomeno cuscinetti assiali quando la sede non è perfettamente perpendicolare all'asse dell'albero. In caso contrario si possono verificare situazioni nelle quali il cuscinetto funziona in modo cinematicamente scorretto generando quindi forti attriti per lo strisciamento, invece che rotolamento, dei corpi volventi sulle piste e con sovraccarichi sugli stessi dovuti alla distribuzione non uniforme del carico.

Nella maggior parte di questi casi si può facilmente risolvere il problema con l'impiego dei corrispondenti cuscinetti orientabili.

Un'altra norma da tenere presente nel montaggio dei cuscinetti radiali (sia rigidi che orientabili) è quella che impone che il bloccaggio assiale dell'albero rispetto al supporto sia affidato ad un solo cuscinetto, mentre l'altro o gli altri debbono potersi spostare assialmente in modo da permettere eventuali dilatazioni o contrazioni del sistema ed evitare forzamenti in fase di montaggio.

Quando il cuscinetto è alloggiato in un supporto in due metà è opportuno che non resti gioco fra le due parti nel serraggio, in quanto un serraggio eccessivo

potrebbe causare l'ovalizzazione dell'anello esterno con conseguente sovraccarico e rapida usura dei corpi volventi.



**Figura 1.4: Cuscinetto ibrido di NKE con corpi volventi in ceramica.**



**Figura 1.5: Cuscinetto a rulli conici di NKE.**



**Figura 1.6: Cuscinetti volventi speciali per turbocompressori di forma complessa. La soluzione adottata dalla SKF si basa su un cuscinetto obliquo ad una corona di sfere in ceramica.**

### **1.3.3 Danneggiamento dei cuscinetti a rotolamento**

I cuscinetti volventi sono componenti meccanici caratterizzati da un vasto campo applicativo. Essi mantengono inalterata la propria affidabilità anche in condizioni estreme. Solo molto di rado presentano difetti precoci. L'eventuale danneggiamento dei cuscinetti volventi, viene evidenziato in prima analisi da un anomalo comportamento del supporto durante l'esercizio:

- corsa irregolare;
- ridotta accuratezza di funzionamento;
- rumore inusuale durante la corsa.

In generale, un guasto dei cuscinetti provoca un aumento del livello complessivo della vibrazione e un aumento del livello di componenti della vibrazione a frequenze specifiche.

Per accertare la causa del danno, non è quasi mai sufficiente eseguire perizie solo sul cuscinetto; occorre piuttosto considerare anche i componenti circostanti, la quantità della lubrificazione, le condizioni d'esercizio ed i fattori ambientali.

L'adozione di procedure di analisi pianificate semplifica la ricerca delle cause.

La presenza di difetti sui cuscinetti si manifesta di norma con un peggioramento del comportamento durante l'esercizio. Solo raramente i danni "spontanei", causati ad esempio da errori di montaggio o mancanza di lubrificante, determinano un'inutilizzabilità immediata.

A seconda delle condizioni di esercizio tra la prima comparsa dei danni e l'effettiva rottura in circostanze particolari, trascorrono mesi.

I guasti dei cuscinetti possono essere suddivisi in:

**GUASTI CICLICI:** difetti localizzati che producono vibrazioni cicliche.

**GUASTI NON CICLICI:** difetti non localizzati.

Il flaking in un anello o in un corpo volvente è usualmente un guasto ciclico.

La corrosione invece non è un difetto localizzato per cui produce un guasto non ciclico, ossia si hanno vibrazioni con contenuto di frequenze molto ricco e non stazionario. Anche l'increspatura provocata dalle correnti elettriche produce vibrazioni non cicliche.

Motivi di guasto:

- nel 70% dei casi si tratta di una lubrificazione errata causata dall'utilizzo di una quantità eccessiva o insufficiente di lubrificante oppure dall'utilizzo di un lubrificante inadeguato;
- nel 20% dei casi si tratta di sporcizia: penetrazione di sostanze liquide o solide. Per questo motivo le guarnizioni sono importanti, in quanto un loro funzionamento difettoso può determinare la fuoriuscita di lubrificante e l'ingresso di sporcizia;
- nel 10% dei casi si tratta di un errore di montaggio: montaggio forzato, riscaldamento eccessivo, regolazione errata e gioco inadeguato, serraggio eccessivo del manicotto conico.

## **1.3.4 Tipologie di guasto sui cuscinetti a rotolamento**

### **1.3.4.1 Flaking**

Descrizione: è il distacco di frammenti di metallo dalla superficie delle piste e dei corpi volventi; è il modo di guasto “naturale” di un cuscinetto, al termine della sua vita, conseguente al deterioramento per fatica del materiale. Può anche insorgere precocemente, in genere per sovraccarico dinamico, anche a seguito di una errata geometria.

Situazione 1: tracce di passaggio normali con sfaldatura nelle zone più caricate.

Cause: cuscinetto con capacità di carico inadeguata, cattiva lubrificazione, ingresso di corpi estranei, ruggine, detriti.

Situazione 2: tracce di passaggio molto estese e marcate su entrambe le piste, con sfaldatura nelle zone più caricate.

Cause: giochi interni insufficienti, conseguenti ad accoppiamento (su albero e/o supporto) troppo forzato; inserimento forzato di una sede conica. Eccessivo pre-carico di cuscinetti obliqui a sfere e a rulli conici. Differenza di temperatura tra anello interno e anello esterno troppo elevata.

Situazione 3: tracce di passaggio anomale in due zone della pista.

Cause: albero o sede nel supporto ovalizzati (disallineamento).

Situazione 4: sfaldatura da compressione assiale.

Cause: montaggio errato, che genera un carico assiale eccessivo, gioco assiale insufficiente a compensare la dilatazione termica.

Rimedi: trovare le cause che generano un carico eccessivo, aumentare la viscosità del lubrificante ed aumentare la portata di lubrificante per garantire un adeguato film d'olio, maggiore precisione durante l'installazione del cuscinetto.



**Figura 1.7:** Cuscinetto a sfere. Il flaking si manifesta sull'anello interno l'anello esterno e le sfere a causa del carico eccessivo.



**Figura 1.8:** Cuscinetto a sfere. Flaking dell'anello interno a causa di un carico assiale eccessivo.



**Figura 1.9:** Cuscinetto a sfere. Flaking solo da un lato dell'anello interno a causa carico assiale eccessivo.



**Figura 1.10:** Cuscinetto a sfere. Flaking di un quarto della pista dell'anello esterno per via di una installazione errata del cuscinetto.

### 1.3.4.2 Peeling

Descrizione: è un raggruppamento di piccole scalfiture o scheggiature, dell'ordine dei  $5/10\mu m$  di profondità, sulle piste o sui corpi volventi. Col tempo può trasformarsi in sfaldatura.

Cause: superficie dell'altro corpo in contatto eccessivamente rugosa, lubrificazione carente o cattiva. Presenza di particelle estranee, ruggine, piccoli detriti.

Rimedi: controllo della rugosità superficiale, utilizzare un lubrificante appropriato, migliorare le tenute.



**Figura 1.11: Rulli a botte. Peeling tondeggiante sui rulli a botte del cuscinetto per via di una scarsa lubrificazione.**



**Figura 1.12: Cuscinetto a rulli conici. Peeling presente sia sull'anello interno che sui rulli conici per via di una scarsa lubrificazione.**



### 1.3.4.3 Spalling

Descrizione: è il distacco di schegge di metallo dalla superficie delle piste e dei corpi volventi; è simile al flaking, con cui spesso viene confusa (il flaking però parte dall'interno, mentre lo spalling parte dalla superficie). Può trattarsi di:

- spalling in senso assiale in fase di montaggio;
- spalling sugli orletti delle piste e sulle teste dei rulli;
- abrasioni sulle piste e sulle superfici dei corpi volventi, nella direzione del moto.

Cause: montaggio o smontaggio non corretto, cattiva lubrificazione. Grippaggio per interruzione della pellicola di lubrificante sulla superficie di contatto, a seguito di un carico o pre-carico eccessivo o di un ingresso di corpi estranei.

Rimedi: migliorare le tecniche di assemblaggio e di smontaggio dei cuscinetti, correzione del pre-carico, utilizzare un lubrificante adeguato e un adeguato sistema di lubrificazione, migliorare la tenuta delle guarnizioni.



**Figura 1.13: Cuscinetto a rulli cilindrici. Spalling dell'orlo per un carico eccessivo.**



**Figura 1.14: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Spalling della superficie della pista di rotolamento per una scarsa lubrificazione.**



**Figura 1.15: Rulli di un cuscinetto a rulli conici. Spalling circolare sulla faccia dei rulli per via di una cattiva lubrificazione.**



**Figura 1.16: Rulli di un cuscinetto a rulli cilindrici. Spalling, in direzione assiale, della superficie del rullo causata durante il montaggio del cuscinetto.**

#### **1.3.4.4 Smearing**

Descrizione: è la conseguenza dello strisciamento sotto carico tra due superfici non lubrificate, per rottura della pellicola di lubrificante: le superfici ne risultano graffiate o striate e spesso, brunite. Il calore generato per attrito porta spesso al trasferimento del materiale per flaking da una superficie all'altra. Tale riscaldamento causa in genere un incrudimento del metallo, con tensioni superficiali e conseguenti incrinature o sfaldature.

Situazione 1 : smearing sulle teste dei rulli e sugli orletti delle piste.

Causa: strisciamento sotto forte carico assiale con lubrificazione inadeguata.

Situazione 2: smearing dei rulli e delle piste, per accumulo di piccoli grippaggi.

Cause: slittamento dei rulli per improvvisi cambiamenti di velocità, slittamento dei rulli all'entrata nella zona in cui sono soggetti a carico radiante, slittamento dei corpi volventi per entrata di corpi estranei. Carico eccessivo e lubrificazione inadeguata.

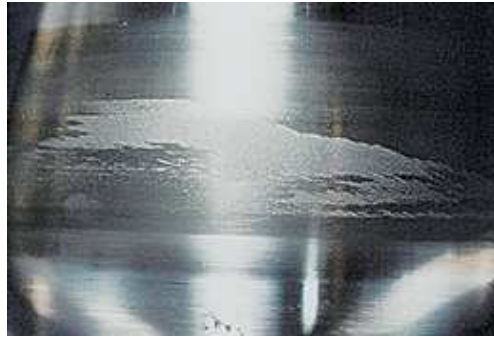
Situazione 3: segni di smearing della pista alla stessa distanza dei rulli.

Causa: l'anello con la gabbia e i rulli è stato inserito a forza nell'altro anello, senza farlo ruotare.

Situazione 4 : smearing in diagonale delle piste dei cuscinetti assiali a sfere.

Causa: velocità di rotazione elevata e carico basso, in questo modo la forza centrifuga porta le sfere a contatto del lato esterno della pista, con conseguente strisciamento anziché rotolamento.

Rimedi: selezionare un opportuno lubrificante, utilizzare un lubrificante con additivi ad alta pressione, applicare un piccolo gioco radiale e un piccolo pre-carico per evitare lo slittamento.



**Figura 1.17: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Lo smearing sulla superficie della pista è causata dalla presenza di detriti, intrappolati tra i rulli, che provocano lo slittamento dei rulli.**



**Figura 1.18: Rullo cilindrico del cuscinetto mostrato in Fig 1.17. Lo smearing sulla superficie del rullo è causata dalla presenza di detriti, intrappolati tra i rulli, che provocano lo slittamento dei rulli.**

### 1.3.4.5 Usura

Descrizione: e' una asportazione di materiale, più evidente nei componenti di minore durezza, con conseguente diminuzione delle dimensioni delle parti usurate la cui superficie appare abrasa.

Cause: presenza di particelle abrasive, preesistenti nel cuscinetto o introdotte in fase di montaggio o con il lubrificante, oppure entrate attraverso le tenute, cui si aggiungono le particelle prodotte dalla stessa usura. Azione abrasiva di ossidi di ferro originati da corrosione. Movimento irregolare dei rulli (non paralleli all'asse). Lubrificazione insufficiente o che ha perso le sue caratteristiche, in questo caso all'inizio le superfici possono risultare lucidate a specchio, per il distacco delle micro-asperità superficiali.

Rimedi: utilizzare un ottimo adeguato lubrificante e un adeguato sistema di lubrificazione, migliorare l'efficienza di tenuta delle guarnizioni, filtrare il lubrificante, eliminare i disallineamenti.



**Figura 1.19: Anello esterno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Segni di usura sulla superficie della pista di rotolamento a causa di una scarsa lubrificazione.**



**Figura 1.20: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Lungo tutta la circonferenza sono evidenti segni di usura della pista di rotolamento, a causa di una scarsa lubrificazione.**



**Figura 1.21: Gabbia di un cuscinetto a rulli cilindrici. Usura da abrasione della gabbia in ottone.**

#### 1.3.4.6 Fretting wear - Fretting corrosion

Descrizione: l'usura da sfregamento "fretting wear" si presenta sulle superfici di contatto tra due metalli, fortemente compresse l'una contro l'altra, soggette a scorrimenti alternativi di piccola entità nell'ordine dei  $\mu m$ . E' tipica delle superfici di contatto cuscinetto-albero e cuscinetto-supporto, dove si presenta in forma di vaiolature. I detriti restano nella zona di contatto accelerando il processo di usura. Nel caso in cui il fenomeno viene innescato da ruggine, o aggravato dalla ossidazione dei detriti; si parla di corrosione da sfregamento "fretting corrosion".

Cause: interferenza da calettamento insufficiente. Sede del cuscinetto irregolare, sull'albero o nel supporto, per cattiva lavorazione o per corrosione.

Rimedi: l'anello interno e l'anello esterno devono essere imballati separatamente durante il trasporto, se non possono essere separati i cuscinetti devono essere precaricati, modificare il lubrificante, modificare l'albero e l'alloggiamento del cuscinetto.



**Figura 1.22: Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. A causa delle vibrazioni, su tutta la superficie della pista di rotolamento è presente fretting wear.**



**Figura 1.23: Anello interno di un cuscinetto a sfere. A causa delle vibrazioni, su tutta la superficie della pista di rotolamento è presente fretting wear.**



**Figura 1.24: Anello esterno di un cuscinetto a rulli cilindrici. In corrispondenza del diametro esterno dell'anello, tutta la superficie presenta fretting corrosion.**



**Figura 1.25: Anello esterno di un cuscinetto a rulli conici. In corrispondenza del diametro esterno dell'anello, tutta la superficie presenta fretting corrosion.**



### **1.3.4.7 Denting - Indentation**

Descrizione: si presenta con delle tacche o incisioni sulle superfici di rotolamento.

Situazione 1: piccole incisioni sulle superfici di rotolamento.

Cause: ingresso di particelle solide come schegge o piccoli detriti dalle tenute, durante l'installazione oppure attraverso il lubrificante.

Situazione 2: piccoli crateri o cavità sui corpi volventi e sulle piste (vaiolatura o pitting).

Cause: contaminazione del lubrificante con particelle solide. Granelli da ruggine. Cattiva lubrificazione.

Situazione 3: impronte di forma ellittica sulle piste dovute a usura, cioè asportazione di materiale, a distanza pari a quella dei corpi volventi, o più fitte per sovrapposizione di impronte in tempi successivi.

Cause: usura dovuta a piccoli strisciamenti dei corpi volventi sulle piste generati da vibrazioni provenienti da fonti esterne, a cuscinetto fermo, quando cioè non si può formare una pellicola di lubrificante.

Situazione 4: intaccature o impronte sulle piste a distanza pari a quella dei corpi volventi, dovute a deformazione di materiale in quanto il carico applicato ne supera il limite di elasticità.

Cause: calettamento troppo forzato su sedi coniche (le sfere e i rulli si piantano nella pista). Urti in fase di movimentazione (caduta del cuscinetto) di montaggio con il martello. Carico eccessivo.

Rimedi: eliminare particelle estranee all'interno del cuscinetto, filtrare l'olio, migliorare l'assemblaggio del cuscinetto.



**Figura 1.26:** Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Le indentazioni sono presenti su un solo lato della pista a causa della presenza di corpi solidi interposti tra i rulli e la pista di rotolamento.



**Figura 1.27:** Rulli a botte di un cuscinetto a rulli. Le indentazioni sono presenti sulla superficie di contatto dei rulli a botte a causa della presenza di corpi solidi interposti tra i rulli e la pista di rotolamento.



**Figura 1.28:** Rulli conici di un cuscinetto a rulli. Le indentazioni sono su tutta la superficie di contatto dei rulli conici a causa di corpi solidi presenti all'interno del lubrificante.



**Figura 1.29:** Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. Le indentazioni sono visibili sulla superficie della pista, sono causate della presenza di corpi solidi interposti tra i rulli conici e la pista di rotolamento.

### 1.3.4.8 Speckles - Discoloration

Descrizione: avvengono, solitamente, a seguito di temperature elevate. Le macchie (speckles) si manifestano sulle superfici di contatto e sono costituite dall'insieme di piccolissime ammaccature, oppure da deposito di olio o ancora dalla reazione metallo-olio o metallo-acqua. Il cambiamento di colore (discoloration) dal giallo-oro al bruno e al blu (brunitura) per surriscaldamento può riguardare, oltre agli anelli, anche i corpi volventi e le gabbia.

Cause: surriscaldamento dovuto alla lubrificazione inadeguata. Macchie di olio prodotte dalla reazione tra metallo e il lubrificante. Deposito di olio deteriorato sulle superfici. Ingresso corpi estranei o contaminanti attraverso le tenute deteriorate.

Rimedi per le macchie: aumentare l'efficienza delle tenute, filtrare l'olio, migliorare il sistema di lubrificazione.

Rimedi per il cambiamento di colore: i depositi d'olio sono rimovibili strofinando l'area danneggiata con un solvente organico.



**Figura 1.30:** Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. La superficie è macchiata a causa del pitting elettrico.



**Figura 1.31:** Sfera di un cuscinetto a sfere. Le macchie sono ovunque, sono causate da una scarsa lubrificazione e dalla presenza di corpi solidi interposti tra le sfere e la pista di rotolamento.



**Figura 1.32: Anello esterno di un cuscinetto a rulli a botte. Parziale deposizione di olio sulla superficie della guida.**



**Figura 1.33: Anello interno ed esterno di un cuscinetto a rulli a botte. La perdita di colore della superficie, della pista dell'anello interno ed esterno, è causata dalla deterioramento del lubrificante.**

### 1.3.4.9 Grippaggio

Descrizione: è spesso la conseguenza estrema di altri modi di guasto: la saldatura tra superfici in movimento relativo è così estesa da bloccarle del tutto, in quanto il surriscaldamento delle parti del cuscinetto le ha rammollite, deformate e fuse, causandone anche il cambiamento di colore (brunitura).

Cause: surriscaldamento dovuto a lubrificazione inadeguata, carico eccessivo, velocità di rotazione troppo elevata, giochi interni insufficienti, pre-carico eccessivo, entrata di acqua e detriti, difetti dell'albero o del supporto, forte flessione dell'albero.

Rimedi: migliorare lo smaltimento del calore dal cuscinetto, utilizzare un lubrificante adatto, prevenire il disallineamento, modificare il pre-carico, migliorare le condizioni di funzionamento.



**Figura 1.34:** Anello interno di un cuscinetto a rulli conici a doppia fila. La causa del grippaggio è una scarsa lubrificazione.



**Figura 1.35:** Rulli conici appartenenti all'anello interno mostrato in figura 1.34. A causa del grippaggio, i rulli hanno subito una perdita di colore, una scheggiatura e una adesione.



**Figura 1.36: Anello esterno di un cuscinetto a rulli a botte. Il grippaggio è dovuto ad una scarsa lubrificazione.**



**Figura 1.37: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. Grippaggio avvenuto per carico eccessivo e lubrificazione inadeguata.**

### 1.3.4.10 Corrosione

Descrizione: è il risultato dell'aggressione chimica di fattori ambientali (acqua, ossigeno e aria) o di fluidi corrosivi penetrati nel cuscinetto. La superficie aggredita presenta segni di usura, vaiolatura (con ossido nelle cavità) ossidazione, ruggine.

Cause: formazione di condensa nel cuscinetto fermo, ingresso di acqua o di fluidi corrosivi, presenza di acqua nel lubrificante.

Rimedi: migliorare l'efficienza delle tenute, controllo periodico dell'olio di lubrificazione, prendere misure preventive, per evitare la ruggine, quando il cuscinetto non è operativo per un lungo periodo di tempo.



**Figura 1.38: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. Corrosione della pista di rotolamento a causa della presenza di acqua nel lubrificante.**



**Figura 1.39: Anello esterno di un cuscinetto a rulli conici. Corrosione della pista di rotolamento a causa della presenza di acqua nel lubrificante.**



**Figura 1.40: Rullo a botte. Corrosione della superficie di contatto del rullo a causa dell'ingresso di acqua nel cuscinetto.**



**Figura 1.41: Anello interno di un cuscinetto a rulli. Corrosione della pista di rotolamento a causa della presenza di acqua nel lubrificante.**



### 1.3.4.11 Cricche e Rotture

Descrizione: le “cricche” sono fessurazioni o crepe del materiale senza il distacco di parti; se si verifica il distacco delle parti, solitamente si parla di “rottura” del componente.

Cause: eccessiva interferenza, carico intermittente eccessivo, shock termico da riscaldamento per sfregamento o strisciamento, geometria della sede di calettamento errata, urti o colpi in fase di installazione o di smontaggio. Crepe conseguenti a:

- saldatura;
- usura;
- smerigliatura;
- corrosione;
- indentazione.

Rimedi: analizzare le cause che generano un carico eccessivo, prevenire lo strisciamento, modificare la forma del cuscinetto.



**Figura 1.42: Anello interno di un cuscinetto a rulli a botte. La rottura è causata da una eccessiva interferenza, il punto di origine della cricca si osserva nel mezzo della superficie della pista di sinistra.**



**Figura 1.43: Anello esterno di un cuscinetto a rulli cilindrici. Suddivisione, in direzione circonferenziale, della pista di rotolamento a causa di un elevato sfaldamento.**



**Figura 1.44: Anello esterno di un cuscinetto a sfere a contatto obliquo. Suddivisione della superficie della pista in direzione circonferenziale a causa dello slittamento della sfere e della scarsa lubrificazione.**

#### 1.3.4.12 Electrical pitting e Flutting

Descrizione: il passaggio di corrente elettrica attraverso gli elementi dei cuscinetti, in particolare tra le piste e i corpi volventi, causa, nei punti di contatto, delle scariche che bruciano la pellicola di lubrificante e fondono il metallo creando piccoli crateri visibili con un adeguato ingrandimento. Con correnti tra 0,01 e 0,1 A l'aspetto delle piste, a occhio nudo, è quello della normale "fatica", ma la vita del cuscinetto si riduce del 20 – 80 %. Correnti dell'ordine del 0,5 A generano per corrosione elettrica delle ondulazioni o scanalature "flutting" sulle piste, oppure vaiolatura "electrical pitting" delle piste e dei corpi volventi con cavità arrotondate e senza ossido, con una riduzione della vita utile maggiore.

Cause: differenza di potenziale elettrico tra i due anelli; è sufficiente una tensione superiore a 0,3 V per cuscinetti a sfere e a 0,5 V per cuscinetti a rulli. Tensione di alta frequenza indotta da strumenti o dispositivi usati vicino al cuscinetto.

Rimedi: utilizzare un cuscinetto isolato elettricamente.



**Figura 1.45:** Anello interno di un cuscinetto a rulli cilindrici. La superficie della pista risulta ondulata a causa del pitting elettrico.



**Figura 1.46: Rulli conici. Il pitting elettrico si verifica nel mezzo della superficie di contatto dei rulli.**



**Figura 1.47: Ingrandimento del pitting elettrico relativo ai rulli di figura 1.46.**



**Figura 1.48: Anello interno di un cuscinetto a rulli conici. Le scanalature sulla superficie della pista sono causate dalla corrosione elettrica “flutting”.**

## 1.4 Il fenomeno della flaking failure

L'area di contatto di un elemento rotolante è idealmente nulla (un punto o una linea). In realtà, quando il cuscinetto è caricato, la deformazione è inevitabile. Nelle condizioni operative normali questa deformazione porta a fatica il materiale di contatto. Ogni punto delle superfici di contatto (piste e corpi volventi) è soggetto, ciclicamente, a deformazione per compressione: queste sollecitazioni intermittenti causano col tempo, nel metallo immediatamente sotto alla superficie, specie in presenza di difetti o imperfezioni metallurgiche della struttura, delle piccole cricche che, gradualmente, si estendono sino a raggiungere la superficie.

In generale per una cricca generata da un contatto superficiale vi sono due situazioni:

- se la cricca si estende nella direzione del movimento del carico allora col passare del tempo la cricca aumenterà la sua lunghezza;
- se la cricca si estende nella direzione opposta a quella di movimento del carico col passare del tempo la cricca non aumenterà di lunghezza.

Il successivo passaggio dei corpi volventi, sulle cricche affiorate in superficie, può causare il distacco di frammenti di materiale dalla superficie di contatto generando in questo modo la “**flaking failure**” ovvero rottura per sfaldatura. La flaking failure è un processo relativamente lungo e la sua presenza è evidenziata da un aumento dei livelli di vibrazione e di rumore nel cuscinetto.

La flaking failure si verifica soprattutto quando i cuscinetti a rotolamento operano sotto errate condizioni di esercizio; ad esempio i cuscinetti volventi utilizzati nelle trasmissioni di automobili e nei differenziali sono soggetti ad usura dovuta a detriti che vengono schiacciati tra i corpi volventi e le piste di rotolamento. I detriti formano delle ammaccature (indentazioni/rientranze) sulla superficie delle piste di rotolamento che finisce per essere colpita dal flaking. La durata del cuscinetto, considerando la superficie danneggiata da

flaking, è molto più breve rispetto alla vita del cuscinetto valutata in condizioni operative normali.

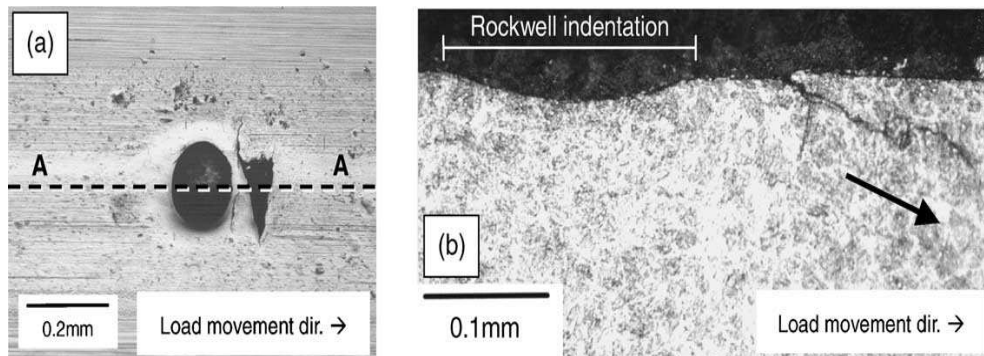
Il flaking dei cuscinetti volventi, dovuto a rotolamento a fatica da contatto (RCF), è generalmente classificato in base al fatto che sia stato originato al di sotto della superficie o in superficie. Tipicamente, il flaking originato al di sotto della superficie si verifica in condizioni di lubrificazione ideali, mentre il flaking originato in superficie si verifica in condizioni di scarsa lubrificazione cioè spessore del film d'olio insufficiente o presenza di corpi estranei nel lubrificante. Nel caso di cricca al di sotto della superficie, essa nasce generalmente da un'inclusione non metallica nel materiale. Pertanto migliorare la pulizia del materiale è una contromisura efficace per evitare che al di sotto della superficie si generino cricche tali da dar vita al flaking.

Negli ultimi anni, la pulizia degli acciai da cuscinetti è migliorata significativamente grazie ai progressi fatti nella siderurgia. Come risultato si è ottenuto che i casi di flaking, generati da inclusioni non metalliche al di sotto della superficie, sono diminuiti. Oggi è normale, per un cuscinetto che opera sotto buone condizioni di lubrificazione, aumentare la sua vita di 10 volte, calcolo fatto applicando la teoria di Lundberg-Palmgren.

Viceversa nel caso in cui il flaking sia generato in superficie, per via di una indentazione sulla pista di rotolamento causata da un lubrificante contaminato da detriti, la vita del cuscinetto sarà notevolmente ridotta. In alcuni casi la vita del cuscinetto è di gran lunga inferiore a quella calcolata con la teoria di Lundberg-Palmgren. Ciò rappresenta un problema nel momento in cui sia necessario determinare la vita dei cuscinetti utilizzati in applicazioni, in cui la lubrificazione è incline alla contaminazione con conseguente indentazione della pista di rotolamento. Una caratteristica del flaking, iniziato con una indentazione, è la cricca iniziale che porta allo sfaldamento. Questa cricca si verifica principalmente sul bordo di uscita dell'indentazione rispetto alla direzione di rotazione. I guasti per flaking, spesso, si verificano attorno alle

indentazioni, generate attraverso i detriti contaminanti, sulla superficie di contatto.

La figura 1.49 mostra una vista dall'alto e una sezione trasversale di un flaking causato da una indentazione di 0,18 mm realizzata artificialmente sulla superficie di contatto.



**Figura 1.49:** Mostra l'esempio di una flaking failure, accompagnata da cricche iniziate sul bordo di uscita di una indentazione, e che si estendono nella direzione di movimento del carico: (a) vista dall'alto della flaking failure in prossimità della indentazione; (b) sezione trasversale lungo la linea A-A mostrata in figura (a).

In questo caso la indentazione agisce come origine dello sfaldamento. Una cricca di solito parte dal bordo esterno della indentazione e si estende nella direzione del movimento del carico. La propagazione di una cricca opposta alla direzione di movimento del carico si osserva raramente.

I ricercatori per testare a fatica i cuscinetti utilizzarono una macchina costituita da due rulli a contatto di diametro differente, il rullo piccolo era il conduttore "driver", mentre il rullo grande era il condotto "follower" e riportava sulla superficie delle indentazioni equispaziate.

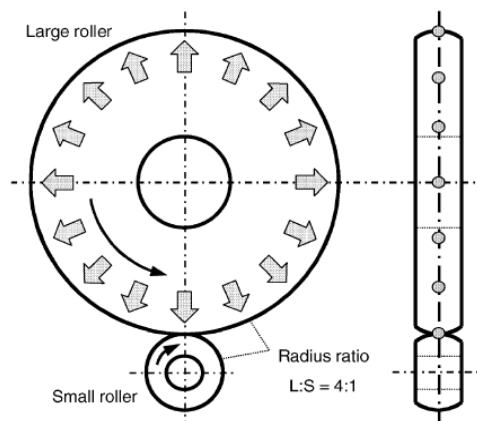
Il verificarsi di una flaking failure viene rilevata dall'aumento delle vibrazioni raccolte da un sensore posizionato vicino ai due rulli. Poiché la vibrazione dei rulli varia a seconda della velocità di rotazione, la soglia relativa di SHUT-DOWN è stata determinata da un aumento del 50% del livello normale di vibrazione corrispondente ad ogni velocità di rotazione.

Dai risultati dei test a fatica sui cuscinetti si è visto che le rotture per flaking failures possono essere accompagnate da entrambe le cricche, una diretta come la direzione del carico e una opposta alla direzione del carico. Recentemente si è scoperto che le flaking failures che avvengono con entrambe le cricche quasi sempre si sviluppano sulla superficie di contatto senza difetti.

Tutte le flaking failures, ottenute durante i test a fatica, erano simili nell'aspetto, indipendentemente dalle condizioni della prova, dal carico di contatto, dal numero di indentazioni e dalla loro dimensione, dalla velocità di rotazione e dal fatto che il piccolo rullo senza difetti era usato come conducente o come condotto. Pertanto, a conclusione dei test, i ricercatori stabilirono che è l'influenza delle indentazioni sulla superficie di contatto la causa principale dello sviluppo di cricche bidirezionali nella flaking failure.

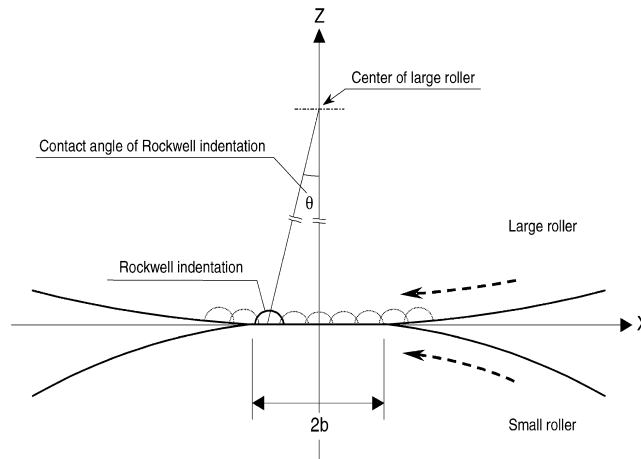
Il chiarimento di un processo che forma, sulla superficie priva di difetti del piccolo rullo, la flaking failure accompagnata da entrambi i tipi di cricche, una diretta come la direzione del carico e una opposta alla direzione del carico, è il punto fondamentale di questa ricerca.

La variazione di pressione al contatto e gli sforzi interni sotto la superficie priva di difetti del piccolo rullo, sono stati calcolati considerando il passaggio un'indentazione, presente sulla superficie del grande rullo, attraverso l'area di contatto, del piccolo rullo, come mostrato nella figura seguente.



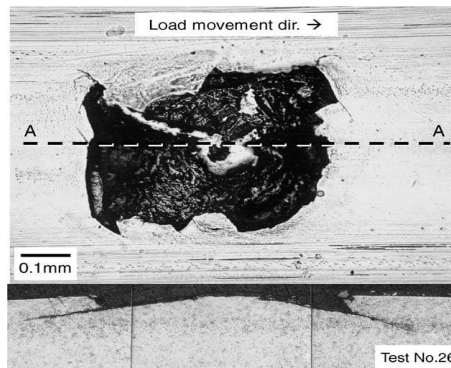
**Figura 1.50:** Schema che rappresenta il doppio rullo utilizzato per il test di fatica.





**Figura 1.51: Movimento della indentazione all'interno della superficie di contatto.**

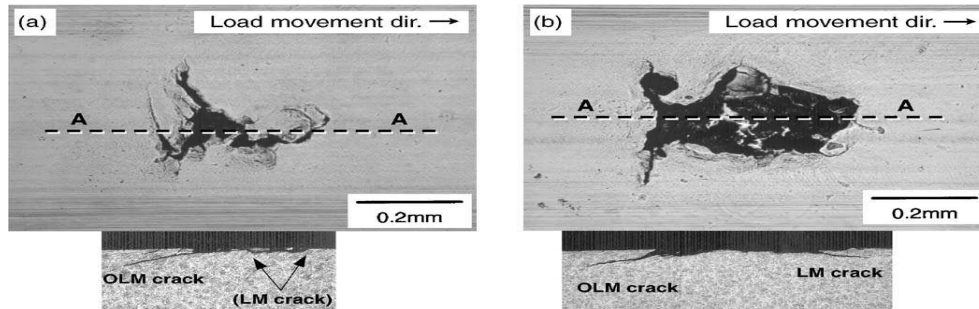
La figura 1.52 mostra una vista dall'alto e una sezione trasversale di un flaking. Questo flaking si è sviluppato sulla superficie senza difetti del piccolo rullo; quest'ultimo ruotando veniva a contatto con la superficie indentata del grande rullo.



**Figura 1.52: Vista dall'alto e sezione trasversale di una flaking failure osservata sulla superficie del piccolo rullo priva di difetti, la rottura è accompagnata da cricche estese in due direzioni rispetto alla direzione di movimento del carico .**

La sezione trasversale mette in evidenza che lo sfaldamento avviene con cricche dirette come il carico e opposte al carico, quindi con cricche bidirezionali.

Entrambe le figure 1.53 (a) e 1.53 (b) mostrano rispettivamente una vista dall'alto e una sezione trasversale di due flaking failures, individuate sul piccolo rullo privo di difetti.



**Figura 1.53: (a) Vista dall'alto e sezione trasversale di una piccola flaking failure, (b) vista dall'alto e sezione trasversale di una grande flaking failure.**

La figura 1.53 (a) mostra una piccola flaking failure con una piccola cricca diretta con la direzione del carico, essa è una frazione della cricca opposta alla direzione del carico. La figura 53 (b) mostra una grossa flaking failure con cricche bidirezionali.

Un flaking, in cui inizialmente è presente solo una cricca opposta alla direzione del carico “**OLM**”, presenterà, molto probabilmente, col passare del tempo, anche una cricca diretta come il carico “**LM**”. Di conseguenza si genera una flaking failure accompagnata da cricche bidirezionali.

Se la formazione della flaking failure ha inizio con solo una cricca diretta come il carico (LM), essa continuerà semplicemente ad estendersi.

Pertanto si presuppone che una cricca opposta alla direzione del carico dovrà esistere prima o dovrà svilupparsi in concomitanza con la cricca diretta con il carico.

Per valutare la flaking failure i ricercatori analizzarono, al microscopio elettronico, le sezioni trasversali del piccolo rullo appartenenti a zone non colpite in superficie da flaking. Dall'analisi effettuata, è stata notata la comparsa, al disotto della superficie, di micro cricche quasi parallele alla superficie di contatto come illustrato in figura 1.54.

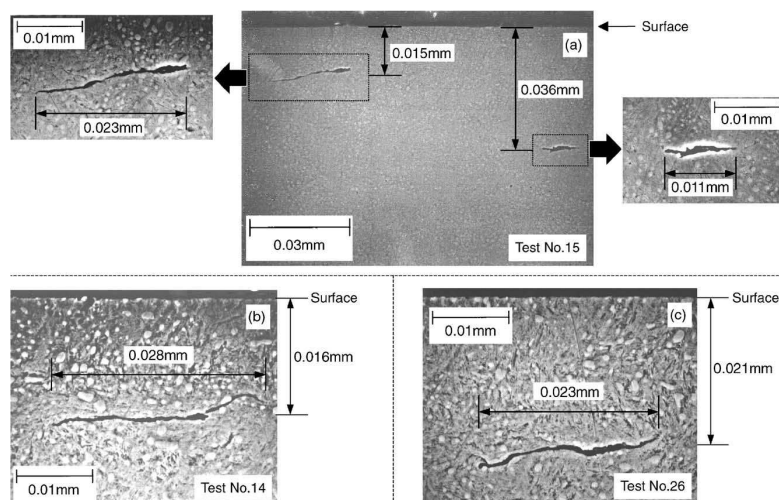


Figura 1.54: Micro cricche al di sotto della superficie e parallele alla superficie di contatto.

Lo sforzo massimo non si generava sulla superficie di contatto, priva di difetti, del piccolo rullo, ma al di sotto di questa a circa 0,02 mm; questo sforzo massimo  $\sigma_{\max}$  risultava essere maggiore della resistenza allo snervamento del materiale. I ricercatori dedussero quindi che il danneggiamento a fatica, causato dall'accumulo di deformazioni plastiche alla profondità della  $\sigma_{\max}$ , provocava l'apertura delle micro cricche.

Dai test a fatica condotti dai ricercatori si evince che:

- la grandezza degli sforzi ortogonali di taglio  $\tau$ , è da attribuire allo sviluppo di micro cricche quasi parallele alla superficie di contatto;
- la  $\tau_{\max}$  si trova alla profondità di 0,02 mm sotto la superficie di contatto, del rullo privo di difetti, quando una indentazione si muove attraverso l'area dei contatto.

L'accrescimento di queste cricche, quasi parallele alla superficie, è il **II modo** ovvero il modo mediante il quale l'accrescimento della cricca a fatica è guidato da uno sforzo  $\tau$  molto amplificato.

La flaking failure accompagnata da entrambe le cricche LM e OLM si forma attraverso il processo illustrato in figura 1.55.

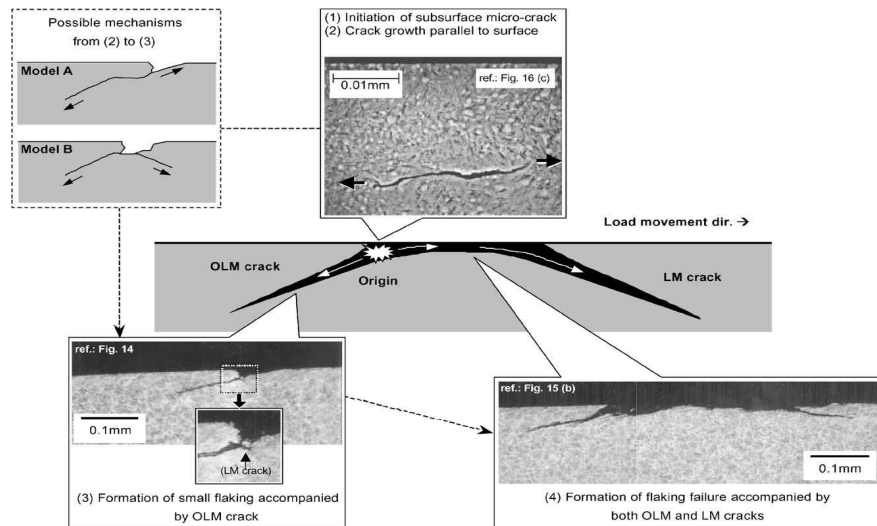


Figura 1.55: Processo di formazione delle cricche bidirezionali nella flaking failure.

Entrambi i modelli, A e B di figura 1.55, sono i meccanismi ritenuti possibili per lo sviluppo di micro cricche, sotto la superficie, in una piccola flaking failure accompagnata da una cricca OLM. Nel modello A la punta sinistra della cricca si estende al di sotto della superficie e la punta destra della cricca si estende in superficie. Nel modello B entrambe le punte della cricca si estendono sotto la superficie. Va osservato che entrambi i modelli includono una cricca OLM.

Per quanto riguarda il piccolo flaking mostrato in figura 1.55 (3), si potrebbe concludere che la sua formazione ha seguito il modello A perché la cricca OLM è molto più evidente. Tuttavia la piccola cricca LM, messa in evidenza dall'ingrandimento della sezione trasversale, implica la possibilità che la formazione del flaking sia avvenuta attraverso il modello B. Attualmente gli studi si stanno concentrando per capire quale tra il modello A e il modello B descrive meglio il fenomeno della flaking failure.

Dai risultati dei test di contatto, a rotolamento a fatica, condotti da diversi ricercatori si è capito che le flaking failures, accompagnate da cricche bidirezionali, si verificano sulla superficie senza difetti quando le indentazioni sono presenti sull'altra superficie di accoppiamento. I ricercatori nei loro studi analizzarono lo stato degli sforzi valutando gli effetti sulla superficie di un

provino, privo di irregolarità, quando una indentazione, appartenente alla superficie di accoppiamento, si muove attraverso l'area di contatto e contemporaneamente è stato fatto un esame approfondito della flaking failures con il microscopio elettronico a scansione.

Come risultato si è concluso che la formazione del processo del flaking failure, con cricche bidirezionali, è il seguente:

1. a causa dell'accumularsi del danneggiamento per fatica causato dall'influenza delle indentazioni sulla superficie di accoppiamento, una micro cricca parte in un'area poco profonda al di sotto della superficie di contatto priva di difetti;
2. la micro cricca interna si estende quasi parallelamente alla superficie di contatto nella direzione del massimo sforzo ortogonale di taglio  $\tau$  ;
3. come risultato dell'ulteriore estensione della cricca interna, si forma una piccola flaking failure accompagnata da una cricca che si estende in direzione opposta al percorso della cricca LM;
4. in fine, il piccolo flaking failure, gradualmente, si espande nella direzione della cricca LM e in questo modo si sviluppa un grande flaking failure con cricche bidirezionali.

Rispetto al punto 2 si è assunto che lo sforzo ortogonale di taglio è parallelo alla superficie di contatto. E' questo il motivo per cui l'estensione della cricca avviene nel modo II.

Rispetto al punto 3, se la formazione di una piccola flaking failure viene preceduta solo con una cricca LM, la cricca LM continuerà semplicemente ad estendersi. Pertanto una piccola flaking failure deve essere accompagnata da una OLM cricca per ottenere come risultato una flaking failure con cricche bidirezionali.

Attraverso un ingrandimento si può ulteriormente osservare che la piccola flaking failure in figura 1.56 (3) ha una piccola cricca LM. Inizialmente

l'osservatore casuale poteva non accorgersene e dichiarare che la flaking failure fosse accompagnata solo da una cricca OLM.

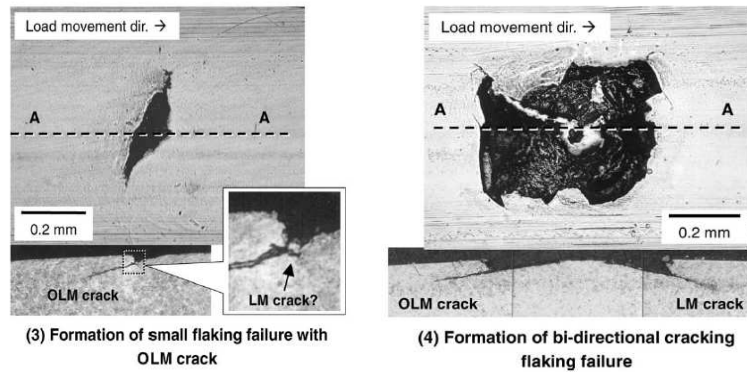


Figura 1.56: Processo della flaking failure accompagnata da cricche OLM e LM.

Le proprietà del modo II di crescita della cricca per acciai da cuscinetti sono state valutate attraverso un metodo caratterizzato dalla sovrapposizione di due carichi statici: (a) un carico di compressione parallelo alla cricca e (b) un momento flettente statico che dovrebbe aprire la cricca. Il carico di compressione statico (a) è per prevenire che la cricca si estenda nella direzione del massimo sforzo di trazione e il momento flettente statico (b) è per ridurre l'interferenza tra le facce della cricca quasi a zero al fine di misurare le proprietà intrinseche del materiale.

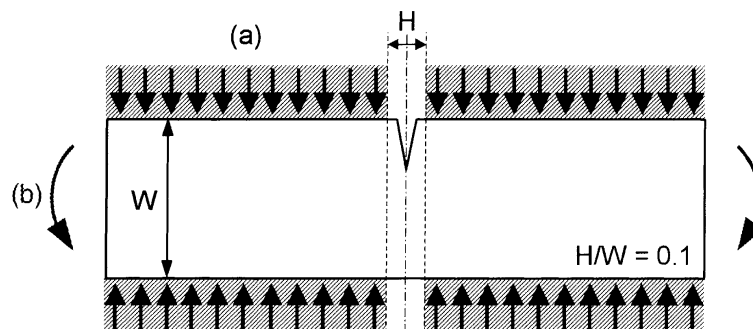


Figura 1.57: (a) Carico statico di compressione, (b) momento flettente statico.

Successivamente, l'intensità degli sforzi, relativi ad una micro cricca al di sotto della superficie, sono stati calcolati simulando il passaggio di una indentazione attraverso l'area di contatto.

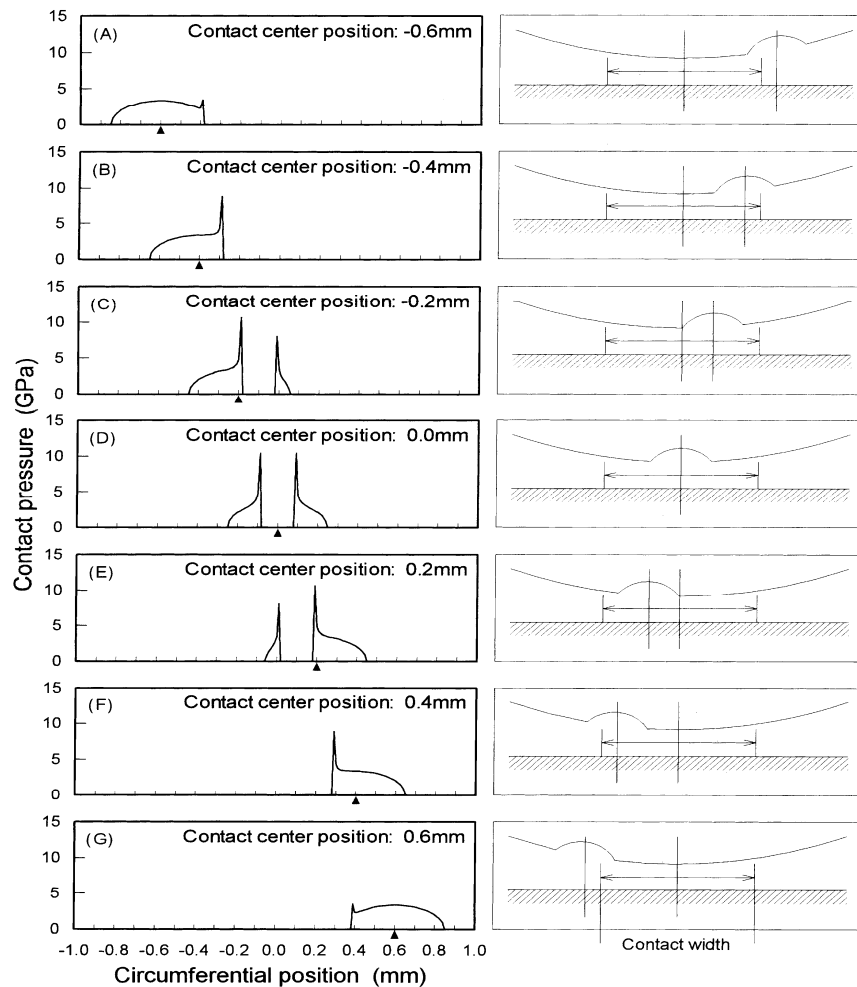


Figura 1.58: Andamento della pressione di contatto quando, l'indentazione sulla superficie di accoppiamento, si muove attraverso l'area di contatto.

Un possibile meccanismo per la formazione della flaking failure, accompagnata da una cricca OLM, viene mostrato in figura 1.59:

- entrambe le punte della cricca si estendono parallelamente alla superficie di contatto, questo modo di espandersi viene detto **modo II**;
- entrambe le punte della cricca iniziano ad estendersi al di sotto della superficie dove gli sforzi di compressione sono minori, questo modo di espandersi viene detto **modo di trazione**;
- con il progredire della cricca il materiale intorno all'origine di essa si frantuma a causa della mancanza di rigidità;

- si è formato una piccola flaking failure accompagnata da una cricca OLM.

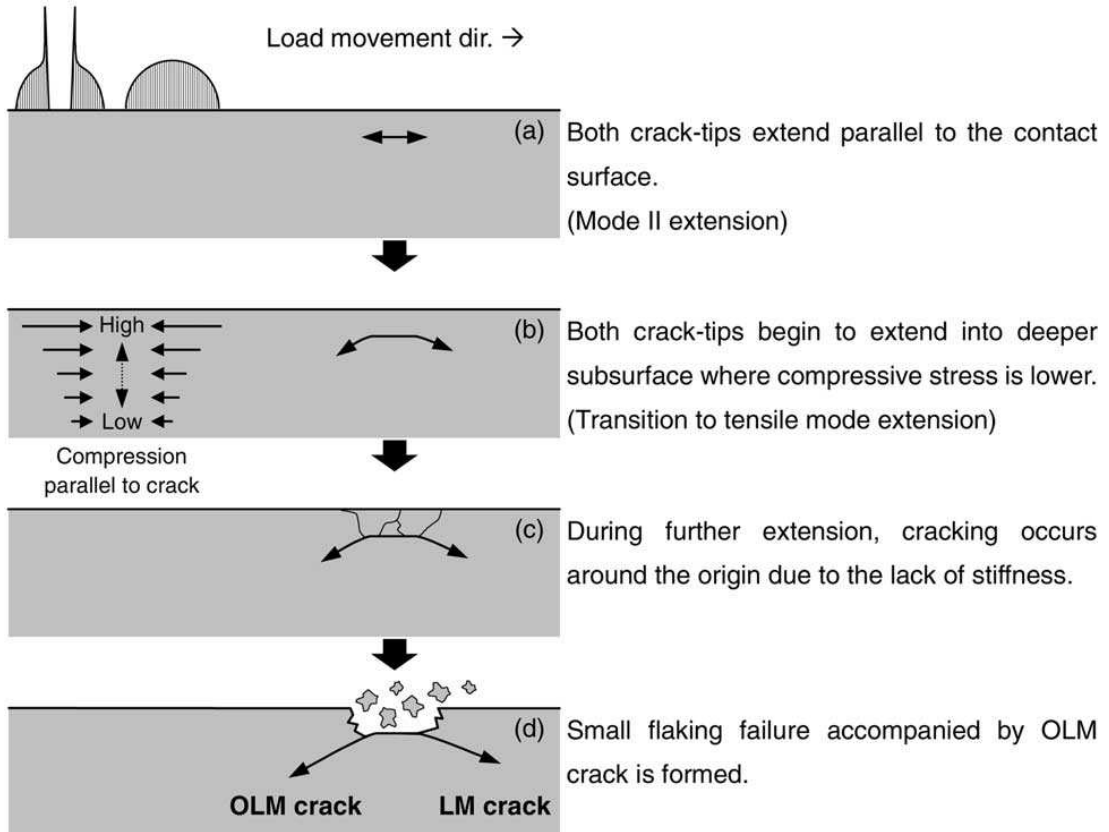


Figura 1.59: Possibile meccanismo di formazione della flaking failure accompagnato da una cricca OLM

La figura 1.60 (a,b) mostra due sezioni che mettono in evidenza una piccola flaking failure. Analizzando queste sezioni si può dedurre che: nella sezione 60 (a) si osservano cricche LM e OLM che si estendono equamente in direzioni opposte, mentre nella sezione 60 (b) si osserva che si estende principalmente una cricca LM.

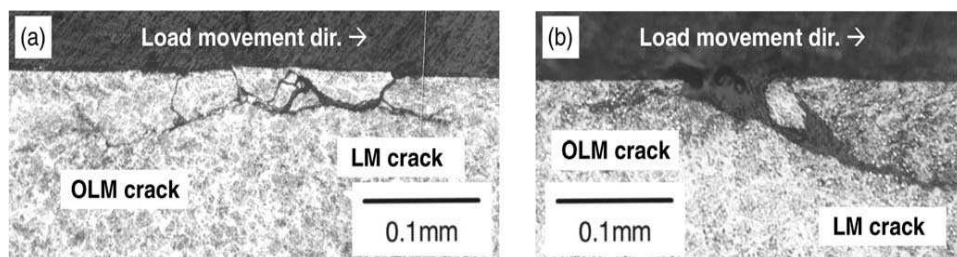


Figura 1.60: Sezioni trasversali di una piccola flaking failure osservata sulla superficie del piccolo rullo.



In aggiunta, la figura 1.61 mostra, attraverso la vista dall'alto e attraverso la sezione trasversale, una tipica flaking failure con cricche bidirezionali.

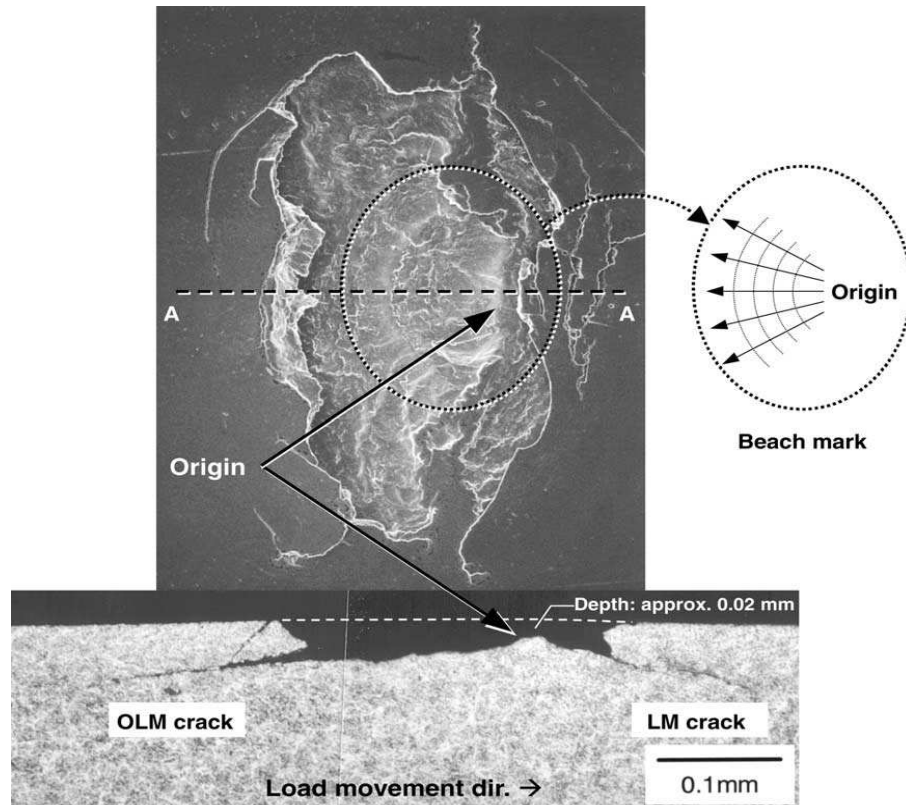


Figura 1.61: Una tipica flaking failure accompagnata da cricche LM e OLM.

La posizione indicata come “origine”, mostrata nella sezione trasversale, sembra il picco di una montagna. La profondità a cui si trova questo picco è approssimativamente di 0,02 mm sotto la superficie di contatto e coincide con la profondità media osservata per la formazione di micro cricche al di sotto della superficie. Si può dedurre che, una micro cricca al di sotto della superficie, iniziata nella posizione di picco, genera una piccola flaking failure accompagnata da una cricca OLM in accordo con il processo spiegato in figura 1.59 e con conseguente formazione della flaking failure con cricche bidirezionali come è mostrato in figura 1.61.

La figura alla destra della foto 1.61 indica la direzione di estensione della cricca rispetto all'origine. L'area di estensione della cricca adiacente all'origine è caratterizzata dalle "linee di spiaggia".

### **1.4.1 Influenza della rugosità**

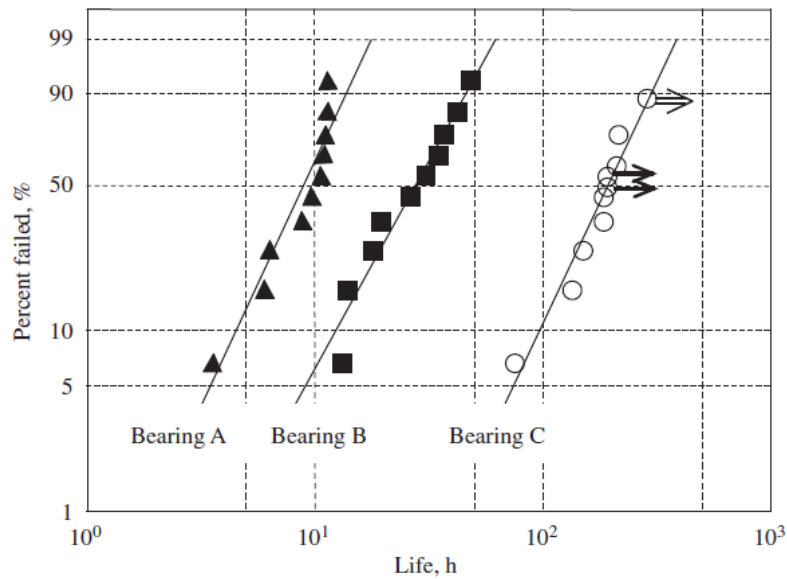
Il fenomeno del flaking è influenzato da diversi fattori, quali ad esempio la rugosità. La rugosità dei corpi volventi o delle piste di rotolamento può essere deteriorata attraverso la presenza, in condizioni di servizio, di un lubrificante contaminato.

Diversi studi condotti in relazione al parametro della rugosità hanno evidenziato che è possibile andare ad aumentare la vita del cuscinetto, attraverso la riduzione del degrado della rugosità superficiale dei corpi volventi, che si verifica in caso di lubrificazione contaminata, e andando a minimizzare la forza tangenziale che agisce sulla pista di rotolamento ai bordi dell'indentazione.

In particolare si riportano le conclusioni di una ricerca effettuata su tre tipi di cuscinetti con differenti difetti che simulano una differente rugosità, il primo tipo di cuscinetti presentava sulla superficie dei corpi volventi le indentazioni, il secondo tipo di cuscinetti presentava sulla superficie dei corpi volventi indentazioni differenti rispetto a quelle presenti sul primo tipo di cuscinetti e infine il terzo tipo di cuscinetti non presentava sulla superficie dei corpi volventi le indentazioni.

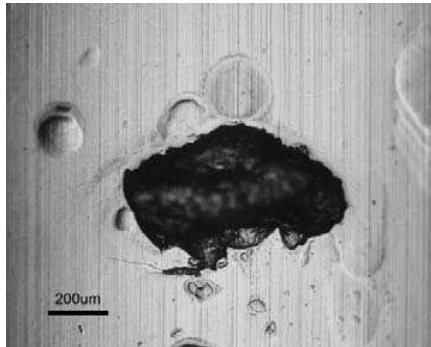
E' stato utilizzato lo stesso banco di prova per svolgere il test a fatica e per realizzare le indentazioni sulla superficie dei corpi volventi, ma il metodo di lubrificazione era differente, infatti, durante la realizzazione delle ammaccature la lubrificazione era a bagno d'olio mentre durante i test a fatica è stata utilizzata una lubrificazione forzata.

La figura 1.62 mostra i risultati dei test a fatica, condotti dai ricercatori, sulla vita dei cuscinetti.



**Figura 1.62: Influenza della rugosità superficiale, degli elementi che rotolano, sulla indentazione che da origine alla flaking failure.**

Tutti i flaking apparsi sulla pista di rotolamento derivano dalla indentazione iniziale.



**Figura 1.63: Indentazione che da inizio allo sfaldamento.**

La vita del cuscinetto è influenzata dalla presenza d'impurità nel lubrificante infatti l'aumento della rugosità superficiale è causata dalle ammaccature realizzate attraverso particelle estranee molto dure presenti nel lubrificante.

Dal grafico di figura 1.62 si evidenzia il fatto che la possibilità che si instauri flaking, generato da una indentazione sui componenti volventi o sulle piste di rotolamento, aumenta all'aumentare della loro rugosità superficiale. Questo è





dovuto anche dal fatto che all'aumentare della rugosità delle superfici a contatto, aumenta anche il valore della forza tangenziale che agisce tra i corpi volventi e la pista di rotolamento.

Sotto le **condizioni di lubrificazione contaminata**, sostanze estranee vengono schiacciate tra gli elementi che rotolano e la pista, si generano quindi delle ammaccature sulla superficie dei corpi volventi e sulla pista di rotolamento, viene così degradata la rugosità superficiale.

Il degrado della rugosità superficiale dà luogo ad una grande forza tangenziale che agisce sul bordo dell'ammaccatura e che va ad accelerare il processo della flaking failure.

Al contrario, in **condizioni di lubrificazione pulita** senza materiale estraneo all'interno del lubrificante, la vita a fatica degli elementi a contatto che rotolano è legata al film di lubrificante, espresso attraverso il parametro  $\Lambda = H_{\min} / \sigma$ , dove  $H_{\min}$  corrisponde al minimo spessore del film di lubrificante e  $\sigma$  corrisponde alla rugosità composta dalle due superfici a contatto. Dalla tabella 1.1 si nota che il valore di  $\Lambda$ , che può essere pari a 3 o inferiore a 3, dipende dalla rugosità superficiale degli elementi che rotolano. Così all'aumentare della rugosità superficiale degli elementi che rotolano,  $\Lambda$  diminuisce e diminuisce quindi il tempo necessario per far comparire, a causa della ammaccatura, il flaking. Quando  $\Lambda$  è piccolo il contatto metallo con metallo aumenta, il coefficiente di attrito aumenta e aumenta pure la forza tangenziale.

**Tabella 1.1: Caratteristiche delle superfici dei cuscinetti utilizzate nei test a fatica.**

	Bearings A	Bearings B	Bearings C
Rolling element	Dents were generated with foreign matter of HV 870  $R_a = 0.024 (\mu\text{m})$ $R_z = 0.53 (\mu\text{m})$	Dents were generated with foreign matter of HV 520  $R_a = 0.022 (\mu\text{m})$ $R_z = 0.28 (\mu\text{m})$	New ball  $R_a = 0.007 (\mu\text{m})$ $R_z = 0.11 (\mu\text{m})$
Raceway	Dents were generated with foreign matter of HV 520  $R_a = 0.039 (\mu\text{m})$ $R_z = 0.61 (\mu\text{m})$		
A of life test Symbol in Fig. 2	2.0 ▲	2.7 ■	3.0 ○

In passato la ricerca e lo sviluppo per migliorare la resistenza dei cuscinetti al flaking aveva puntato su materiali più resistenti e sul fatto di diminuire lo stato di sforzo nell'area dove il flaking si verificava. Tuttavia, i risultati dei test riportati in figura 1.62 indicano chiaramente che il flaking sulla pista di rotolamento è collegato anche alla finitura superficiale dei corpi volventi in quanto essi sono la parte di accoppiamento in un cuscinetto a rotolamento.

### **1.4.2 Influenza della durezza**

La caratteristica del materiale che influenza di più la resistenza alla ammaccatura è la durezza. Naturalmente, più il materiale è duro e più sarà alta la resistenza all'ammaccatura. La durezza della martensite, la quale è la fase principale per un acciaio da cuscinetti, è determinata attraverso il contenuto di carbonio. Se il contenuto di carbonio negli acciai da cuscinetti è già alto, vi è poco margine per aumentare la durezza del materiale attraverso la durezza della martensite.

Una soluzione per migliorare la vita di un cuscinetto a sfere, che opera in **condizioni di lubrificante contaminato**, è quella di migliorare la resistenza delle sfere alle ammaccature.

In merito all'influenza della durezza sulla vita del cuscinetto, i ricercatori condussero dei test di durata a fatica, utilizzando cuscinetti aventi sfere realizzate con un materiale contenente nitrato precipitato; i test furono fatti in condizioni di lubrificazione contaminata. Al termine del test si individuavano le eventuali presenze di ammaccature generate sui corpi volventi per verificare se era stato raggiunto un aumento della vita del cuscinetto attraverso un miglioramento della resistenza alle ammaccature delle sfere.

Dai risultati dei test i ricercatori capirono che grazie all'uso di elementi volventi, contenenti nitrato precipitato, si migliorava la condizione di resistenza all'ammaccatura, si aveva quindi un minore degrado della rugosità superficiale e veniva ridotta la forza tangenziale che agiva ai bordi

dell'ammaccatura sulla pista di rotolamento, era quindi possibile ottenere un aumento della vita del cuscinetto.

In generale si evince che:

- nei test in cui le condizioni di prova, per generare le ammaccature sulla pista, erano le stesse per ogni cuscinetto testato, si è notato che maggiore era la rugosità superficiale degli elementi che rotolavano e più breve era la formazione dell'ammaccatura che dava il via al flaking;
- rispetto alle componenti del cuscinetto realizzate con materiale standard, le componenti realizzate con materiali aventi un alto grado di durezza, per la presenza di silicio e nitruro di manganese precipitati, avevano una resistenza superiore all'ammaccatura e avevano fornito una migliore resistenza alla degradazione della rugosità superficiale (che si verifica in condizioni di lubrificazione contaminata) dei corpi volventi;
- in condizioni di lubrificante contaminato, i risultati dei test, nei quali si utilizzavano cuscinetti con corpi volventi realizzati con materiale contenente silicio e nitruro di manganese, mostravano che le piste avevano una resistenza al flaking pari al doppio, in termini di tempo, rispetto alla resistenza al flaking dei cuscinetti realizzati con corpi volventi in acciaio standard. Pertanto si ritiene che il materiale dell'elemento rotante contenente silicio e nitruro di manganese può prolungare la vita del cuscinetto, dando una maggiore resistenza alla formazione di ammaccature e riducendo in questo modo l'azione della forza tangenziale ai bordi della ammaccatura sulla pista di rotolamento.

### 1.4.3 Influenza della forza tangenziale

La figura 1.64 illustra il meccanismo attraverso il quale il flaking si verifica sul bordo di una ammaccatura. La figura 1.64 assume un modello dove esiste un'ammaccatura, sulla pista di rotolamento, e una sfera. Appena la sfera, e di conseguenza il carico, passa sopra l'ammaccatura, una grande forza tangenziale viene generata a bordo dell'ammaccatura a causa del rigonfiamento del materiale in quel settore (fig. 1.64 p2). La grande forza tangenziale generata provoca poi il flusso plastico del materiale intorno all'ammaccatura. Inoltre se la forza tangenziale è generata, come mostrato in figura, da sinistra a destra, un grande sforzo di trazione nasce sul bordo sinistro dell'ammaccatura e un grosso sforzo di compressione nasce sul bordo destro dell'ammaccatura.

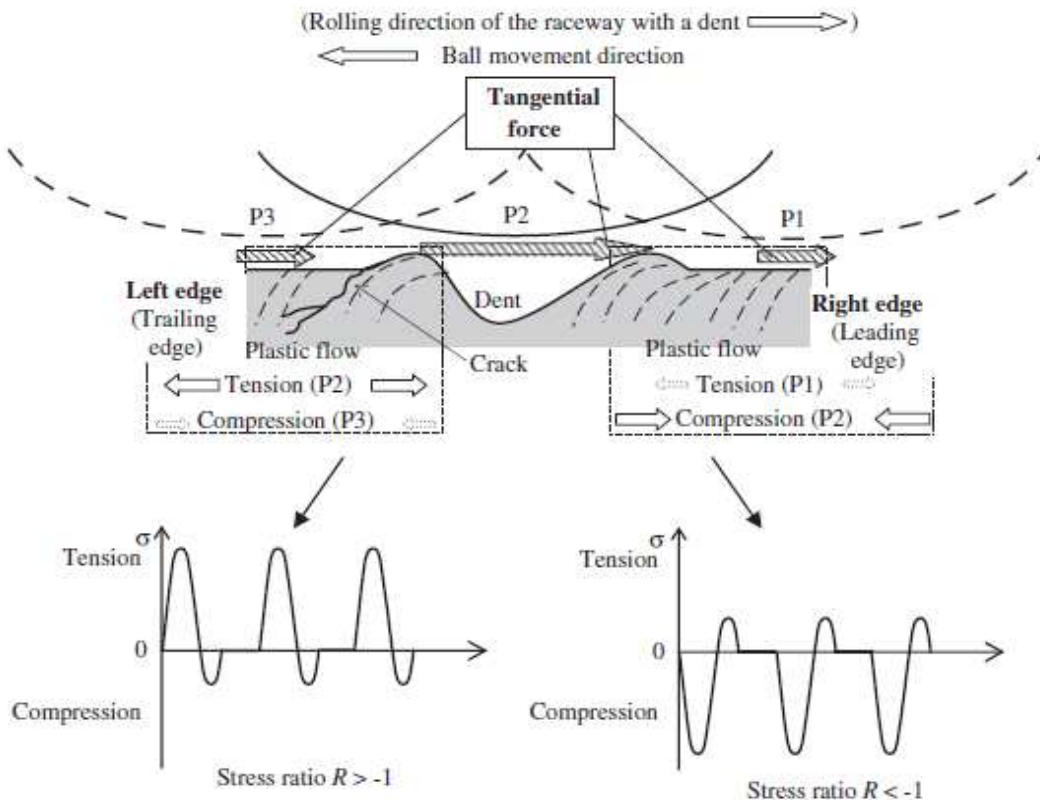


Figura 1.64: Azione degli sforzi sui bordi dell'ammaccatura.

Nel caso in cui l'ammaccatura non esista, lo sforzo di trazione e lo sforzo di compressione, generati dalla forza tangenziale nella zona di contatto, sono gli stessi in ogni punto di contatto grazie alla forza tangenziale costante.

Tuttavia, nel caso in cui l'ammaccatura esiste, sul bordo sinistro del dente lo sforzo di trazione che si genera all'ingresso dell'area di contatto (fig. 1.64 p2) diventa più grande dello sforzo di compressione generato in uscita dall'area di contatto (fig. 1.64 p3). Questo perché la forza tangenziale diventa grande sul bordo della ammaccatura. Tuttavia, a destra del bordo della ammaccatura lo sforzo di compressione generato all'uscita dell'area di contatto (fig. 1.64 p2) diventa più grande dello sforzo di trazione generato all'ingresso dell'area di contatto (fig. 1.64 p1).

I grafici di figura 1.65 rappresentano l'andamento del ciclo di tensione-compressione in direzione tangenziale, generato su entrambi i bordi dell'ammaccatura al passaggio del carico. Sul **bordo sinistro** dell'ammaccatura il rapporto di fatica  $R$ , definito come  $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ , è maggiore di -1 mentre sul **bordo destro**  $R$  è minore di -1. La vita a fatica associata ad un rapporto  $R > -1$  è minore rispetto alla vita a fatica associata ad un rapporto  $R < -1$ . Quindi la cricca inizia dal bordo sinistro del dente e si propaga facilmente fino a causare la flaking failure.

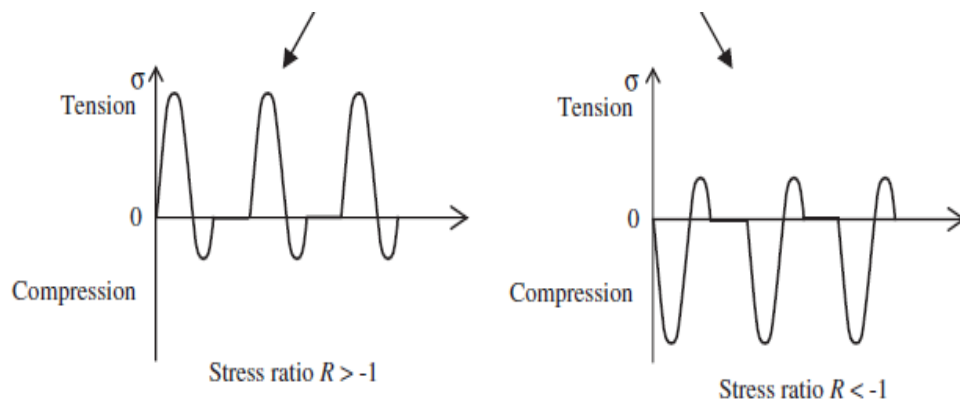
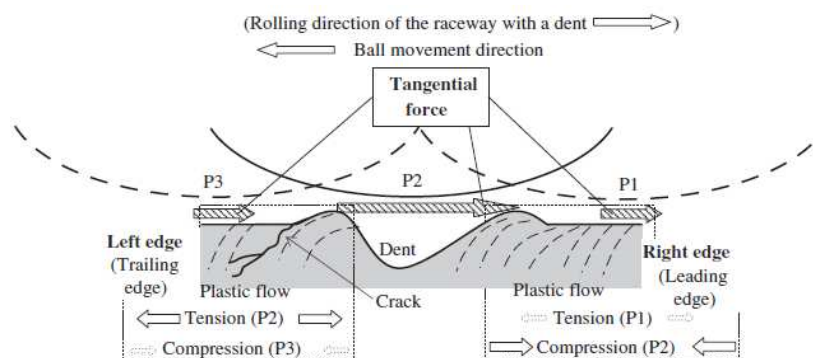


Figura 1.65: Andamento del ciclo di tensione-compressione in direzione.

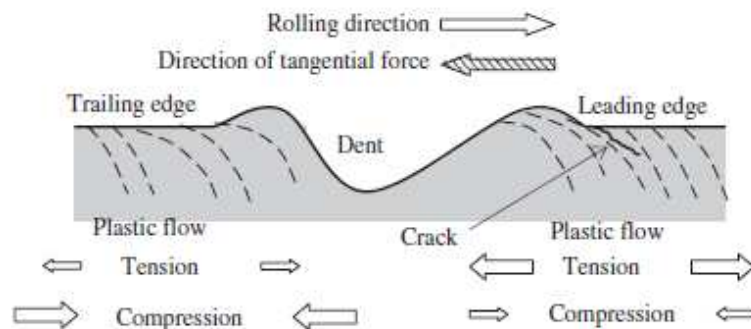


Il modello della figura 1.66 è riferito a una **ammaccatura presente sul disco condotto**, la direzione della forza tangenziale, generata sul bordo della ammaccatura, coincide con la direzione di rotazione della pista. In questo modello un grande sforzo di trazione viene generato sul bordo di uscita dell'ammaccatura rispetto alla direzione di rotazione quindi, per via di questo elevato sforzo di trazione, inizia a formarsi una cricca sul bordo di uscita del dente.



**Figura 1.66: Posizione di partenza della cricca quando l'ammaccatura è presente sul componente che è condotto.**

La figura 1.67 mostra una **ammaccatura che è presente sul disco conducente**.



**Figura 1.67: Posizione di partenza della cricca quando l'ammaccatura è presente sul componente che conduce.**

Nel caso di figura 1.67, la direzione della forza tangenziale a bordo del dente è nella direzione opposta a quella di rotazione della pista. In questo caso un grande sforzo di trazione è generato sul bordo d'ingresso dell'ammaccatura rispetto alla direzione di rotazione, per via di questo elevato sforzo di trazione, una cricca si genera sul bordo d'ingresso dell'ammaccatura.

Analizzando il caso di un cuscinetto reale a rotolamento, il flaking può verificarsi sul bordo di ingresso o sul bordo di uscita di una ammaccatura, rispetto al senso di rotazione. Questo dipende **se l'ammaccatura è nella parte del cuscinetto che opera da conduttore o da condotto**. Tuttavia, come descritto precedentemente, il flaking si verifica prevalentemente sul bordo di uscita dell'ammaccatura rispetto al senso di rotazione. Il motivo per cui si verifica questo è stato capito grazie ai test a fatica con doppio disco svolti dai ricercatori. I test hanno rivelato che le cricche si propagano facilmente sul componente condotto nel caso in cui il bordo d'uscita dell'ammaccatura, rispetto alla direzione di rotazione, diventa il bordo su cui agisce il più grande sforzo di trazione per via dell'influenza della forza tangenziale.

#### **1.4.3.1 Influenza della direzione della forza tangenziale**

Diversi ricercatori hanno condotto studi sulla forza tangenziale che agisce tra i corpi volventi e la pista di rotolamento, per capire che influenza avesse sul fenomeno della flaking failure.

Pertanto, al fine di verificare l'influenza della forza tangenziale sull'ammaccatura che dà il via al flaking, i ricercatori condussero prove di fatica dove la direzione della forza tangenziale che agiva nel cuscinetto con ammaccature artificiali, cambiava a causa del cambiamento del verso di rotazione.

Il primo test consisteva nel far ruotare i cuscinetti nella direzione normale per la durata di tutto il prova. Nel secondo test veniva fatto ruotare il cuscinetto in direzione inversa (rotazione inversa) per 10 ore dopo di che i cuscinetti

venivano fatti girare nella direzione normale per tutto il restante tempo della prova. Nel terzo test veniva fatto ruotare il cuscinetto in direzione inversa (rotazione inversa) per e 20 ore dopo di che i cuscinetti venivano fatti girare nella direzione normale per tutto il restante tempo della prova.

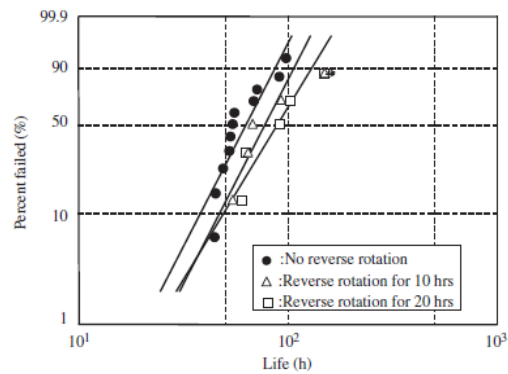
Tabella 1.2: Modalità dei test.

<i>Condition 1</i>	
Introduction of dent into the raceway	●
<i>Condition 2</i>	
Operated for 10h in reverse rotation of fatigue test after introducing a dent	△
<i>Condition 3</i>	
Operated for 20h in reverse rotation of fatigue test after introducing a dent	□

La direzione del movimento del flusso plastico del materiale ai bordi dell'ammaccatura è imposto dalla direzione che ha la forza tangenziale. Tramite i test effettuati dai ricercatori, si è capito che invertendo la forza tangenziale si allunga la vita al cuscinetto, perché una cricca non cresce facilmente se il flusso plastico di materiale interseca la direzione di crescita della cricca, mentre una cricca si forma più facilmente se il flusso plastico di materiale si muove nella direzione di crescita della cricca.

Inoltre si è visto che in condizioni d'esercizio del cuscinetto, in cui la forza tangenziale è piccola, se il verso degli elementi rotanti viene cambiato (cambia la direzione della forza tangenziale) c'è solo un piccolo cambiamento nella vita del cuscinetto; ma se la forza tangenziale è grande e il verso degli elementi rotanti viene cambiato (cambia la direzione della forza tangenziale) la vita del cuscinetto viene migliorata di molto.

Dai risultati dei test diagrammati figura 1.68 si nota che la vita del cuscinetto è estesa dalla rotazione inversa, **maggiore è la rotazione inversa e maggiore sarà la vita del cuscinetto.**



**Figura 1.68: Influenza, dell'inversione di rotazione, sulla ammaccatura che da origine alla flaking failure**

Attraverso i risultati, mostrati in figura 1.68, si può dedurre che, se durante il test si applica l'inversione della rotazione, la forza tangenziale viene generata in direzione opposta alla direzione della forza tangenziale generata durante il test con rotazione normale. Questo processo crea un flusso plastico di materiale che va ad intersecare, durante il test a fatica, la direzione di crescita della cricca; in questo modo si blocca la crescita della cricca e si rallenta il fenomeno della flaking failure.

I ricercatori scoprirono che, durante la rotazione inversa, il grande sforzo di trazione, che aveva generato la cricca sul bordo dell'ammaccatura in condizioni di rotazione normale, viene sostituito dalla comparsa, sullo stesso bordo dell'ammaccatura, di un grande sforzo di compressione.

Questo grande sforzo di compressione generato dall'inversione della rotazione persiste durante il test del cuscinetto in condizioni di rotazione normale.

In conclusione si può affermare che il miglioramento della vita del cuscinetto, mostrato in figura 1.68, è influenzato dal flusso plastico di materiale che interseca la direzione di crescita della cricca e dalle tensioni residue di compressione. In altre parole i risultati di figura 1.68 indirettamente suggeriscono che la direzione della forza tangenziale e quindi quella del flusso plastico di materiale, influenza la vita del flaking.

#### 1.4.4 Influenza del lubrificante

Per verificare ulteriormente l'influenza della forza tangenziale sull'ammaccatura che da inizio al flaking è stata condotta una prova a fatica utilizzando un olio con alto coefficiente di trazione e un olio industriale multiuso.

In un ambiente con lubrificazione pulita c'è una relazione tra RCF (rolling contact fatigue) e il parametro film lubrificante, ovvero  $\Lambda = H_{\min} / \sigma$ . Il maggiore fattore della lubrificazione che influenza lo spessore del film di lubrificante è la viscosità cinematica. Per questo motivo, i test condotti dai ricercatori furono fatti utilizzando come lubrificante un olio con alto coefficiente di trazione e un olio industriale multi uso che avevano quasi la stessa viscosità.

Dai risultati di questi test i ricercatori si accorsero che, anche se i valori del parametro del film di lubrificante  $\Lambda$  erano quasi uguali, sotto le condizioni di lubrificazione, con un olio ad alto coefficiente di trazione, la vita dell'ammaccatura, che da inizio al flaking, era più corta. Infatti sotto queste condizioni, le cricche partite dal bordo dell'ammaccatura si propagavano più facilmente perché aumentava la forza tangenziale che si generava a bordo dell'ammaccatura. Ancora una volta, i test condotti dai ricercatori mettono in evidenza come la forza tangenziale gioca un ruolo importante nello sviluppo della flaking failure causata da una ammaccatura.

Si può affermare che:

- la forza tangenziale locale generata sul rigonfiamento del bordo di una ammaccatura è grande;
- come descritto sopra c'è una relazione tra posizione in cui inizia la cricca dal bordo della ammaccatura e la direzione della forza tangenziale;
- invertendo il verso della forza tangenziale, la vita dell'ammaccatura che da il via al flaking si prolunga;

- quando è usato un olio con un alto coefficiente di trazione, la vita del cuscinetto, sotto le condizioni di lubrificante contaminato, diventa corta.

Si può quindi stabilire che l'influenza della forza tangenziale, sull'ammaccatura che avvia il flaking, è grande.

Di seguito vengono riportati schematicamente i punti principali che spiegano il meccanismo di formazione del flaking avviato da una ammaccatura.

- Dal momento che esiste un rigonfiamento sul bordo della ammaccatura, una grande forza tangenziale è generata sul bordo della ammaccatura, e un grande flusso di materiale plastico si genera sul bordo dell'ammaccatura.
- A causa dell'influenza della forza tangenziale, le cricche a fatica iniziano dal bordo dell'ammaccatura dove lo sforzo di trazione è maggiore.
- Le cricche di fatica si propagano attraverso gli sforzi di taglio e attraverso gli sforzi di trazione a causa dell'effetto idraulico dell'olio che penetra nelle cricche. Si verifica così il flaking.

I lavori sviluppati dai diversi ricercatori sono serviti per cercare di chiarire sperimentalmente il meccanismo della flaking failure avviata da una ammaccatura, osservata nei cuscinetti volventi.

Riassumendo, dai dati di letteratura si evince che:

- la forza tangenziale accelera l'avvio della cricca sul bordo dell'ammaccatura;
- la posizione di partenza della cricca sul bordo di un'ammaccatura è determinata dalla direzione della forza tangenziale piuttosto che dalla direzione di rotolamento;
- la cricca si propaga molto più facilmente sul bordo della ammaccatura sul componente condotto rispetto al componente conducente;

- sulla base delle misurazioni effettuate e sui cambiamenti di configurazione delle ammaccature prima e dopo i test a fatica, i ricercatori dimostrarono che un grande sforzo di trazione, a causa della forza tangenziale, veniva generato sul bordo d'uscita dell'ammaccatura nella direzione della forza tangenziale; mentre un grande sforzo di compressione veniva generato sul bordo di ingresso dell'ammaccatura a causa della forza tangenziale;
- i test condotti dai ricercatori dimostravano che il motivo principale per cui il “flaking” si verificava essenzialmente sul bordo d'uscita dell'ammaccatura, rispetto alla direzione di rotazione, è il seguente: le cricche nascono e si propagano facilmente sul componente condotto dove il bordo di uscita dell'ammaccatura, rispetto alla direzione di rotazione, diventa il bordo che ha il più grande sforzo di trazione, a causa dell'influenza della forza tangenziale che agisce tra i corpi volventi e le piste;
- altri autori hanno suggerito che la vita dell'ammaccatura, che dà il via al flaking, può essere prolungata attraverso l'inversione del senso di rotazione del cuscinetto, provocando in questo modo l'inversione della forza tangenziale che agisce sull'ammaccatura. Il miglioramento della vita del cuscinetto è dovuto al fatto che il flusso plastico di materiale, mosso dalla forza tangenziale, diretta con verso opposto, per via dell'inversione di rotazione, interseca la direzione di propagazione della cricca e quindi rallenta il fenomeno della flaking failure;
- oli lubrificanti con un alto coefficiente di trazione possono ridurre significativamente, nei cuscinetti volventi, la vita dell'ammaccatura che dà il via al flaking.

Sulla base dei risultati sopra descritti si afferma che, le forze tangenziali, generate tra la pista di rotolamento e le sfere, influenzano significativamente la vita della ammaccatura che avvia il flaking.

Tuttavia, le misurazioni quantitative, le analisi per determinare l'entità della forza tangenziale locale che lavora sul bordo della ammaccatura e la distribuzione degli sforzi intorno all'ammaccatura devono ancora essere effettuate.

In futuro si sarà in grado di determinare quantitativamente l'influenza della pressione di contatto, il grado di scorrimento, la dimensione delle ammaccature, l'altezza del rigonfiamento sul bordo della ammaccatura, l'intensità della forza tangenziale generata sul bordo della ammaccatura e la distribuzione degli sforzi intorno all'ammaccatura; sperando che questo serva a prevenire il flaking avviato da un'ammaccatura e a migliorare la vita dei corpi volventi e quindi la vita dei cuscinetti.



## **2 Procedura sperimentale**

Si analizza in questo capitolo la procedura sperimentale utilizzata per caratterizzare il comportamento del materiale.

### **2.1 Caratterizzazione metallografica**

La caratterizzazione dei materiali è una fondamentale necessità nello studio dei materiali. È interessante poter valutare le caratteristiche possedute nelle diverse direzioni da un laminato, essendo intrinsecamente anisotropo. La caratterizzazione consta di analisi chimiche, per stabilire la composizione media del campione, metallografiche volte a rilevare la percentuale di fasi esistenti, la loro distribuzione spaziale reciproca e la distribuzione di imperfezioni strutturali.

#### **2.1.1 Esame della microstruttura**

Lo studio sperimentale della microstruttura è chiamato metallografia. Per far ciò, si utilizza il microscopio che consente di investigare più a fondo la struttura del materiale, prestando attenzione al fatto che più grande è l'ingrandimento utilizzato, più difficile è essere sicuri che ciò che si vede sia una corretta descrizione del tutto, per cui si sono utilizzati ingrandimenti differenti per limitare questo effetto.

#### **2.1.2 Preparazione dei campioni**

I campioni vengono ricavati utilizzando il taglio con mola fresatrice che crea il piano su cui verrà operata l'analisi suddetta. Particolare cautela deve essere riposta durante il taglio per evitare che la zona di interesse subisca un'alterazione delle caratteristiche microstrutturali, riducendo la veridicità dell'analisi. A tal scopo, la lama abrasiva, che costituisce il tagliente, viene bagnata con un flusso abbondante di acqua miscelata con un additivo oleoso

idrosolubile per la protezione contro la corrosione e per evitare il surriscaldamento del materiale in esame che potrebbe, se soggetto ad un apporto termico non trascurabile, modificare le sue caratteristiche metallografiche portando ad errate conclusioni. Con queste accortezze, il taglio con mola permette di ottenere una superficie regolare ed eviterà il manifestarsi di danni superficiali causati dal surriscaldamento.

### **2.1.2.1 Procedura**

Dopo che il disco abrasivo è stato selezionato, i provini vengono saldamente fissati a due agganci per operare il taglio della sezione desiderata, facendo particolare attenzione alla pressione di taglio per impedire il danneggiamento del disco abrasivo. Una volta che si è ottenuto il campione, viene pulito con acetone o alcol per evitare che possano rimanere depositi di acqua o abrasivo che corroderebbero il campione.

### **2.1.3 Spianatura**

I campioni passano alla fase successiva di spianatura ove si rimuovono gli effetti del taglio. Questo passo vede l'utilizzo della macchina spianatrice che è costituita da un piatto rotante su cui è collocata una carta abrasiva al SiC, avente una specifica granulometria, che viene bagnata da un flusso di acqua il cui scopo è, da un lato, quello di ridurre il riscaldamento del campione stesso e, dall'altro, quello di allungare la vita media della carta, allontanando lo sfrido.

#### **2.1.3.1 Procedura**

Si incomincia con la granulosità maggiore (definita con il grado 180) e si passa alla carta successiva avente minore granulosità solo quando ogni passo abradente rimuove le rigature del passo precedente. Per ottenere una superficie particolarmente piana, si è soliti ruotare i campioni di 90° ad intervalli regolari; ciò consente di eliminare le rigature lasciate dalla precedente passata, migliorando l'appiattimento ottenibile. Una sequenza soddisfacente coinvolge i

formati della granulosità 180, 320, 400 e 800 ricordando che la profondità delle rigature diminuisce con il formato abrasivo. Questa sequenza è conosciuta come il metodo “tradizionale”. Si è poi passati alla carta 1200 che consente di ottenere una migliore qualità superficiale, potendo così passare alle fasi successive di lucidatura.

## **2.1.4 Lucidatura**

La lucidatura è la fase finale della preparazione dei campioni e ha lo scopo di creare una superficie a “specchio”, esente da graffi, necessaria per la successiva analisi. La tecnica di lucidatura non deve introdurre difettosità superficiali, per questo i panni da lucidatura devono essere trattati con cautela e chiusi dai loro coperchi successivamente all’utilizzo. La macchina lucidatrice è costituita da una serie di piatti rotanti su cui sono fissati panni a basso pelo che vengono caricati con pasta diamantata, l’abrasivo di lucidatura.

### **2.1.4.1 Procedura**

Nel laboratorio di Dipartimento, sono presenti tre piatti, ciascuno dei quali possiede un abrasivo avente rispettivamente granulometria di  $6 \mu\text{m}$ ,  $3 \mu\text{m}$  e  $1 \mu\text{m}$ . Il campione viene contemporaneamente ruotato, ad intervalli regolari, per evitare la formazione di microscopiche scalfitture superficiali note come “code di cometa”. Dopo aver preparato ogni campione, la qualità della lucidatura viene valutata al microscopio ottico con ingrandimenti fino a 200X, i quali devono rivelare un’immagine nitida ed esente da alcun genere di graffio che non era stato individuato ad occhio nudo.

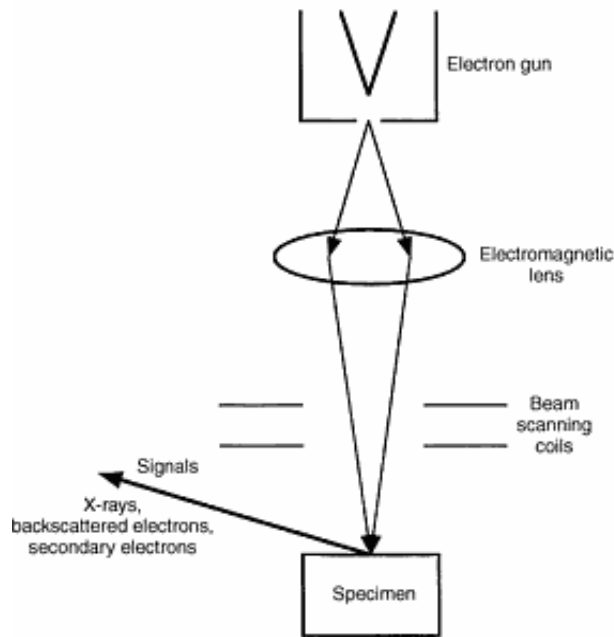
## **2.1.5 Attacco chimico**

L’attacco chimico è utilizzato con lo scopo di rilevare le caratteristiche strutturali di un materiale, le quali non sono evidenti allo stato lucidato. Infatti, l’esame del campione dopo la lucidatura permette solitamente di individuare

aspetti strutturali come le cricche, porosità ed inclusioni non metalliche, ma non la distribuzione delle fasi presenti, la loro dimensione e morfologia. Il principio che sta alla base è quello di un attacco corrosivo selettivo verso una delle fasi o costituenti presenti nel materiale, creando così un impercettibile “bassorilievo” superficiale, che consente di vedere le fasi presenti già al microscopio ottico.

### **2.1.6 SEM**

Il potere risolutivo del microscopio ottico è limitato, e quindi nessun vantaggio sostanziale si può ottenere neppure con l’ingrandimento delle micrografie ottenute direttamente con questo. Se si desiderano ingrandimenti che vadano oltre i 500X, si deve optare per la microscopia elettronica, che consente di raggiungere poteri risolutivi più elevati. Il microscopio elettronico utilizzato è il SEM o microscopio elettronico a scansione (Fig. 2.1). I diversi punti del campione vengono esplorati da un sottile fascio elettronico. Tramite un cannone elettronico vengono generati elettroni che sono accelerati da una differenza di potenziale che può variare tra 1 e 50 kV, i quali vengono successivamente focalizzati da un sistema di lenti magnetiche, sul campione; appositi dispositivi consentono sia degli spostamenti del fascio secondo righe parallele successive, sia di spostare il campione relativamente al fascio per variare la zona in esame, come pure l’inclinazione. È ovviamente importante che la camera entro cui si effettui l’analisi sia sotto vuoto e a questo scopo è presente un impianto apposito.



**Figura 2.1: Microscopio elettronico a scansione**

È opportuno ricordare che, quando un fascio di elettroni di qualche decina di keV colpisce la superficie di un materiale, una parte di questi elettroni incidenti, mantenendo la loro energia, vengono riflessi, mentre gli altri perdono la loro energia trasferendola agli elettroni del solido.

Vicino alla zona in cui il campione è colpito dal fascio elettronico, sono presenti vari rilevatori che recepiscono il flusso secondario di elettroni che è costituito da quelli riflessi e da quelli emessi. I rilevatori trasformano il segnale in ingresso in formato elettronico che, tramite un tubo catodico, permette la visualizzazione, in tempo reale, su uno schermo della porzione di campione investita dal flusso di elettroni primari.

### 2.1.7 Microdurezza Vickers

La prova di microdurezza costituisce un altro importante passo verso la caratterizzazione meccanica del materiale. Come è noto, la durezza può essere definita quale resistenza opposta alla penetrazione di un altro corpo. Su tale principio sono basati i metodi più usati in campo metallurgico; essi si differenziano per la forma del penetratore (sfera, cono, piramide) e per le condizioni dell'esperienza.

Questa è la modalità utilizzata per valutare tale proprietà. Il pezzo è fissato su una piattaforma mobile, grazie a due viti micrometriche posizionate ai lati della piattaforma stessa. La prova consiste nel premere sul pezzo con un penetratore diamantato a forma di piramide retta a base quadrata con un angolo al vertice di  $136^\circ$ , sotto un carico  $P$  che può variare tra 1 e 1000 gf, dopo aver selezionato l'area con il microscopio ottico annesso. Si misurano, in seguito, con quest'ultimo, le diagonali dell'impronta lasciata sulla superficie dopo aver rimosso il carico (Fig. 2.2). Per tutte le prove di microdurezza si assume che l'impronta non subisca alcun recupero elastico. Una volta che si sono misurate le diagonali dell'impronta, si calcola il valore della durezza Vickers (HV) secondo la formula presente in norma ASTM E384:

$$HV = 1.8544 \cdot \frac{P}{d}$$

dove con  $P$  si designa la forza applicata espressa in kgf e con  $d$  la diagonale misurata in mm.

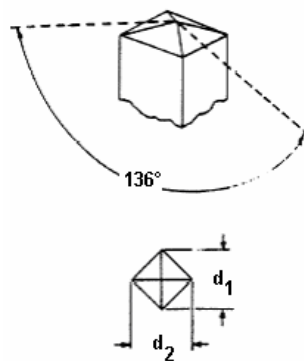


Figura 2.2 Penetratore a forma di piramide, diagonali lasciate dell'impronta.

La misura delle dimensioni dell'impronta è operata mediante un sistema micrometrico con un traguardo fisso ed uno mobile nel campo oculare in cui si acquisiscono le diagonali suddette. Il microdurometro di laboratorio, a questo punto, consente di ricevere automaticamente in uscita su schermo il valore di microdurezza Vickers.

Particolare attenzione deve essere posta nella scelta della forza applicata, infatti, più è bassa, più piccola risulterà l'impronta e l'errore compiuto nella valutazione della diagonale avrà un maggior peso rispetto al caso in cui si utilizzi un carico superiore. Le principali cause di errore nell'esecuzione del test sono da attribuirsi a vibrazioni, inopportuna progressione del carico applicato, errata stima del carico, scorretta durata del periodo di applicazione ed impatto.

## **3 Failure analysis**

### **3.1 Il Problema**

Un'azienda leader nella produzione di cuscinetti realizza diversi tipi di sistemi di trazione; questi sistemi di trazione vengono impiegati per molte applicazioni in particolar modo vengono utilizzati nelle macchine agricole.

L'azienda prima di effettuare la prova in loco del sistema di trazione, ha sottoposto la scatola degli ingranaggi a severi test di resistenza.

Al termine di questi test, condotti sulla scatola degli ingranaggi, non ci sono stati particolari problemi da sottolineare.

I risultati dei test di laboratorio indicavano che la condizione generale della scatola d'ingranaggi 607W2V era buona, tali risultati sono in accordo con i requisiti richiesti dall'azienda, quindi i test preliminari sulla scatola d'ingranaggi 607W2V si considerarono completati con successo e successivamente iniziarono "le prove sul campo".

Alla fine delle prove sul campo il dispositivo d'azionamento dell'ingranaggio, con 1247 ore di funzionamento, è stato analizzato visivamente: non è stato rilevato nessun problema sui denti dell'ingranaggio però molte indentazioni sono state rilevate sulle piste di rotolamento del cuscinetto, le più importanti erano presenti sulla pista esterna sia dal lato del motore che dal lato del cambio.

Secondo l'azienda queste indentazioni sulla pista erano coerenti con le spaziature del cuscinetto a sfere.



### 3.1.1 Campioni analizzati

I campioni analizzati corrispondono a due sezioni del dispositivo di trazione.

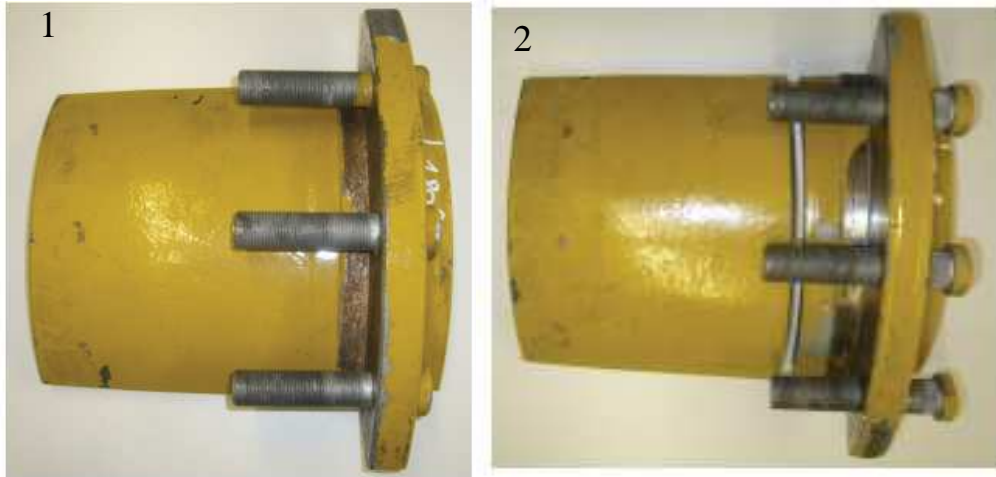


Figura 3.1: Primo campione e secondo campione del sistema di trazione.

Il secondo campione, quello con il danno maggiore, è stato sezionato.



Figura 3.2: Secondo campione.

## 3.2 Risultati e discussione

### 3.2.1 Esame visivo

Sono state analizzate le due piste di rotolamento appartenenti al secondo campione, quello maggiormente danneggiato.

In seguito la pista di rotolamento lato ingranaggio sarà indicata come “GS” mentre la pista di rotolamento lato motore sarà indicata come “MS”.



Figura 3.3: Sono indicate la pista lato motore e lato ingranaggio del cuscinetto.

Sulla pista “GS” sono visibili due grossi danni, entrambi hanno una larghezza superiore ad 1 mm.

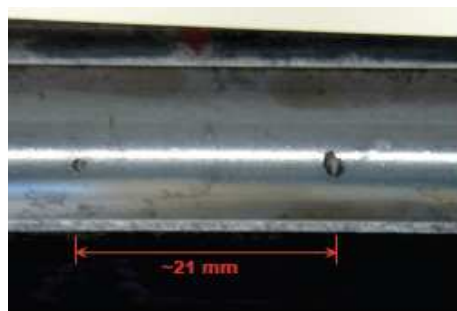


Figura 3.4: Distanza tra i due danni principali individuati sulla pista “GS”.

Sempre attraverso un'analisi visiva, relativa alla superficie della pista, si possono osservare diversi piccoli difetti posizionati vicini e lontani dai due danni principali.



Figura 3.5: Difetti secondari individuati lontano dai danni principali.

Dall'analisi visiva si evince che:

- l'analisi visiva ha definito la presenza di due grossi danni sulla pista "GS" del cuscinetto;
- tramite l'analisi visiva sono stati individuati molti piccoli difetti sia sulla pista "GS" che sulla pista "MS";
- il rilevamento dei difetti può anche essere effettuato toccando la superficie delle piste.

Per capire meglio i fenomeni che hanno provocato il danno, sono state effettuate su entrambe le piste del cuscinetto, "MS" e "GS", le **analisi al SEM**.

### 3.2.2 Analisi del danneggiamento (mediante SEM)

#### Pista “GS”

Il primo grosso macroscopico danno sulla pista “GS” del cuscinetto ha un diametro maggiore di 1 mm.

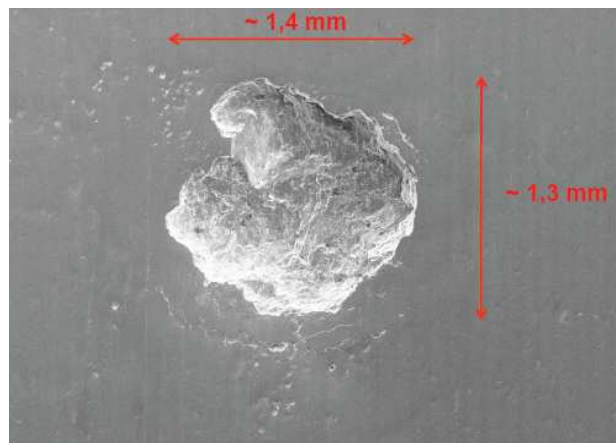


Figura 3.6: Primo danno principale sulla pista “GS”.

L’espansione laterale del difetto avviene in due direzioni, inoltre la rimozione di detriti sembra essere avvenuta in direzione normale a quella di rotolamento.

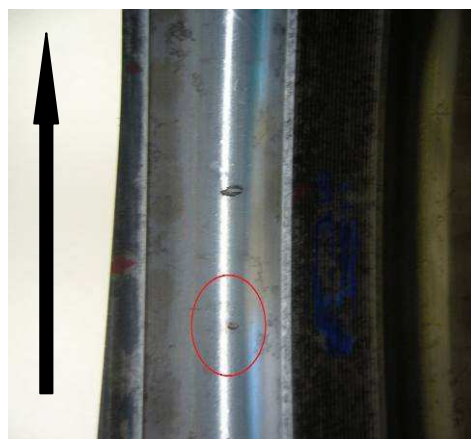
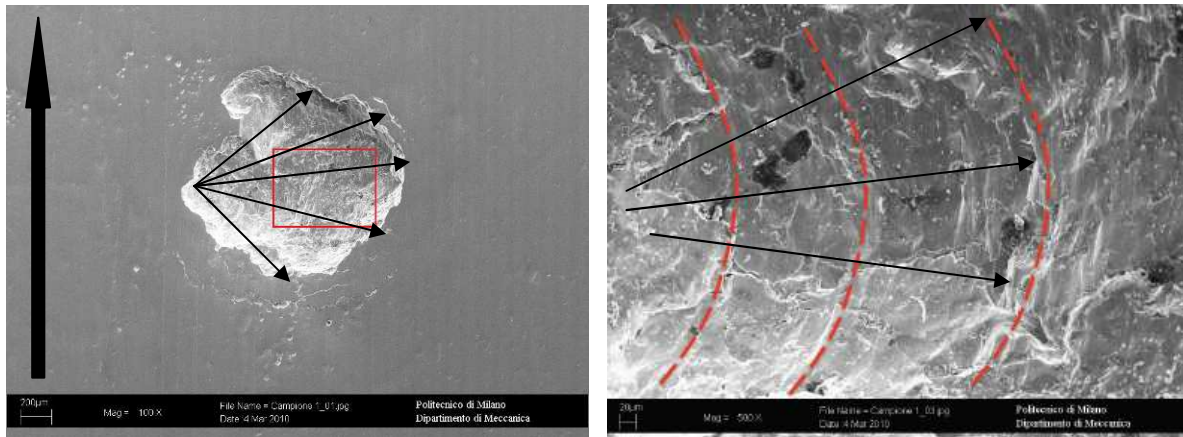
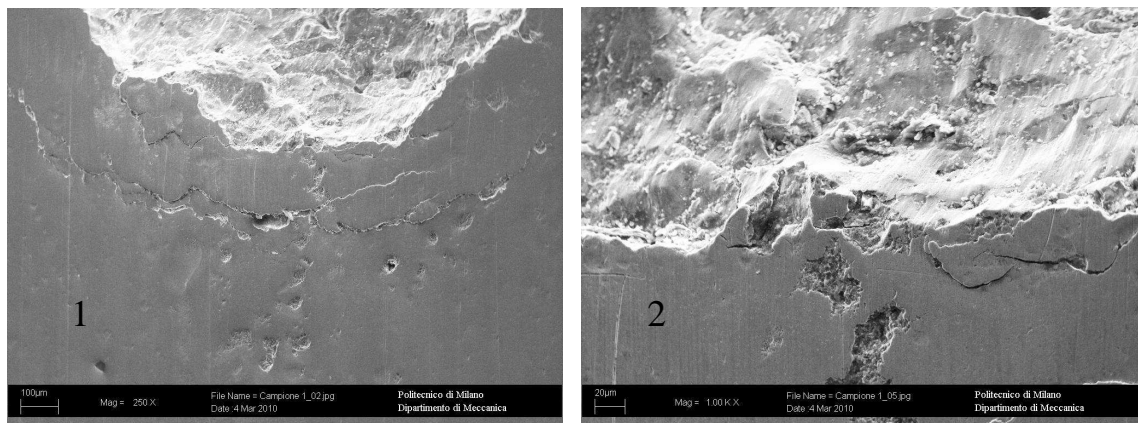


Figura 3.7: Direzione di rotolamento.



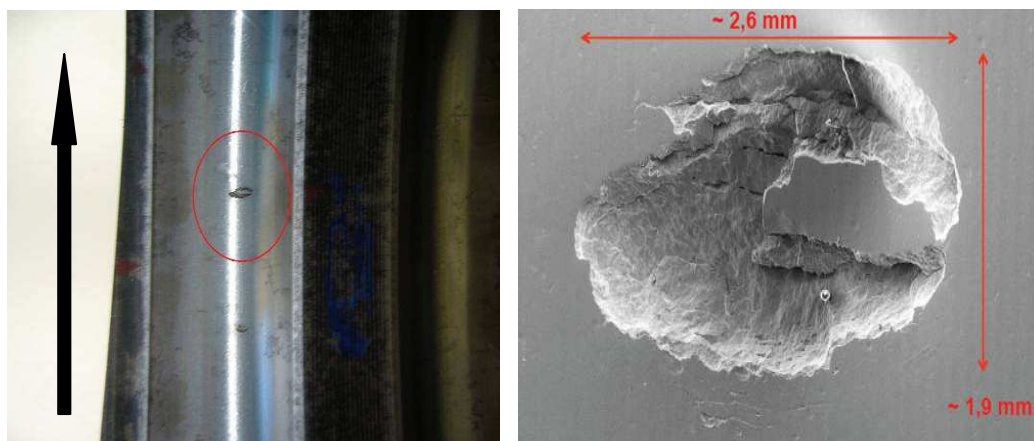
**Figura 3.8:** Asportazione di detriti in direzione normale alla direzione di rotolamento.

Sotto al macroscopico danno, attraverso l'analisi SEM, sono visibili delle cricche secondarie circolari e dei piccoli buchi.



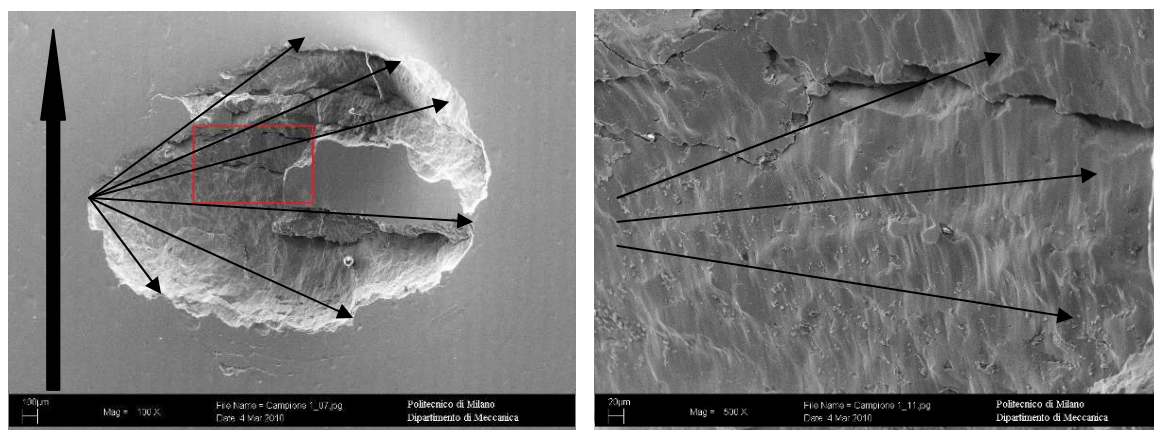
**Figura 3.9:** (1) Cricche circolari, (2) piccoli buchi.

Il secondo macroscopico danno, sulla pista “GS”, è ampiamente esteso ed è di dimensioni superiori rispetto al primo danno macroscopico. Dei residui di detriti sono presenti all’interno del buco.



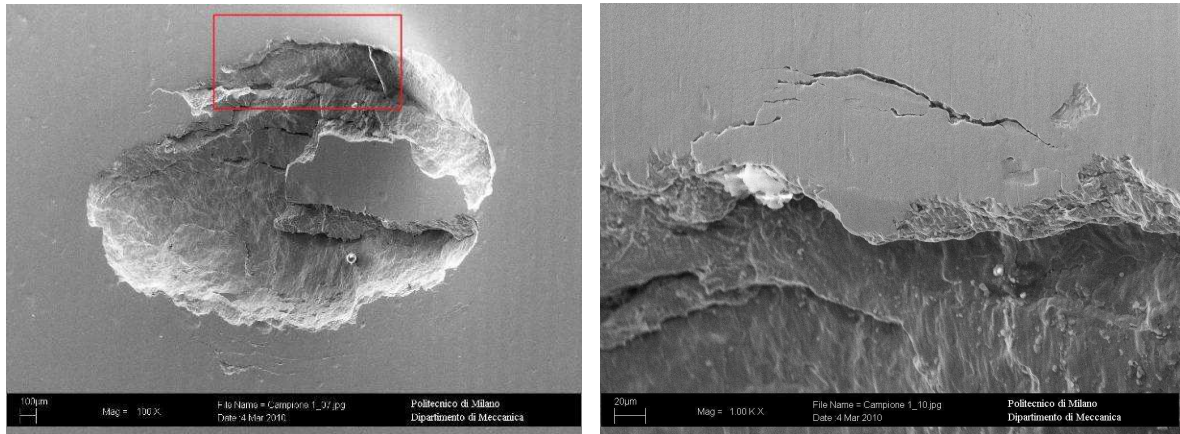
**Figura 3.10: Secondo danno principale sulla pista “GS”.**

L’espansione laterale del difetto avviene in due direzioni, mentre la rimozione di detriti sembra essere avvenuta in direzione normale a quella di rotolamento.



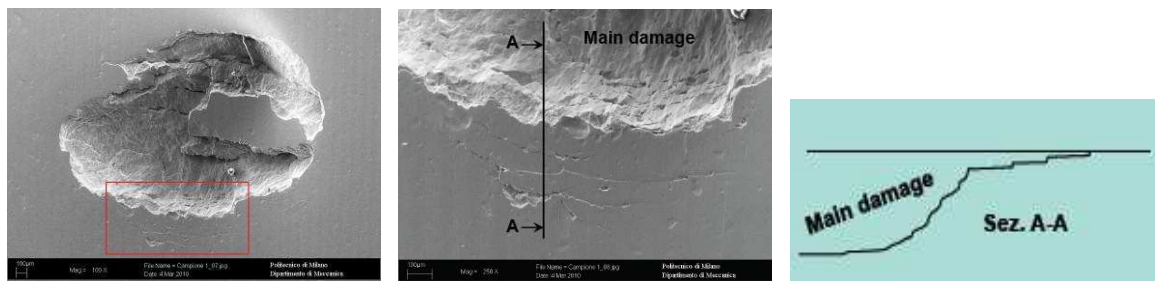
**Figura 3.11: Asportazione di detriti in direzione normale alla direzione di rotolamento.**

Sopra al macroscopico danno principale l'analisi al SEM ci permette di individuare alcune cricche secondarie e piccoli buchi.



**Figura 3.12:** Cricche e piccoli buchi presenti al di sopra del danno principale.

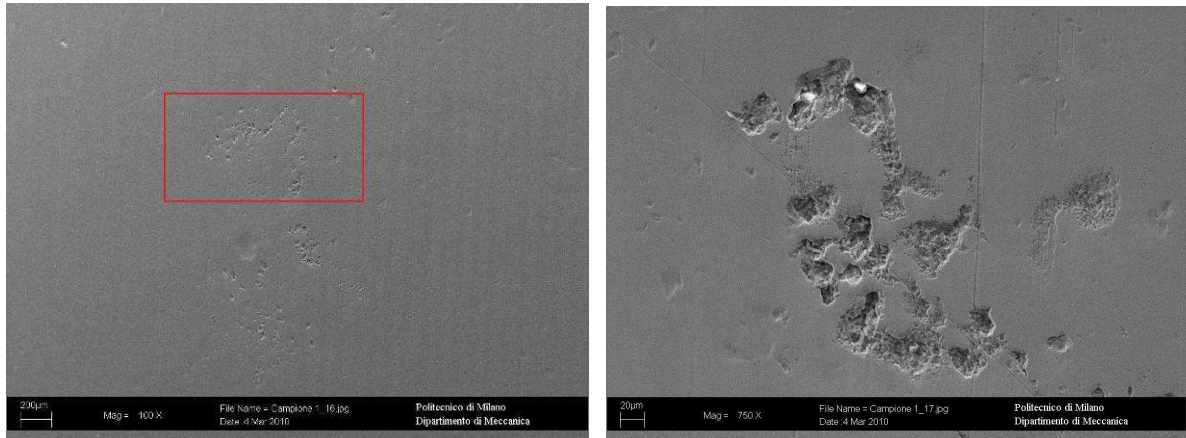
Al di sotto del danno principale, attraverso l'analisi al SEM, sono visibili alcune cricche.



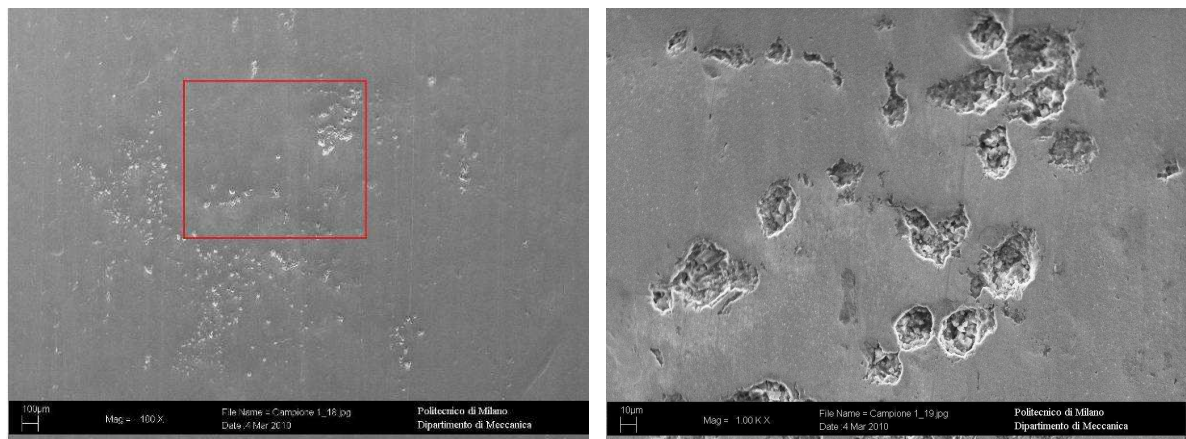
**Figura 3.13:** Cricche presenti al di sotto del danno principale.

Queste cricche secondarie sono chiaramente collegate al carico che agisce all'interno dell'indentazione.

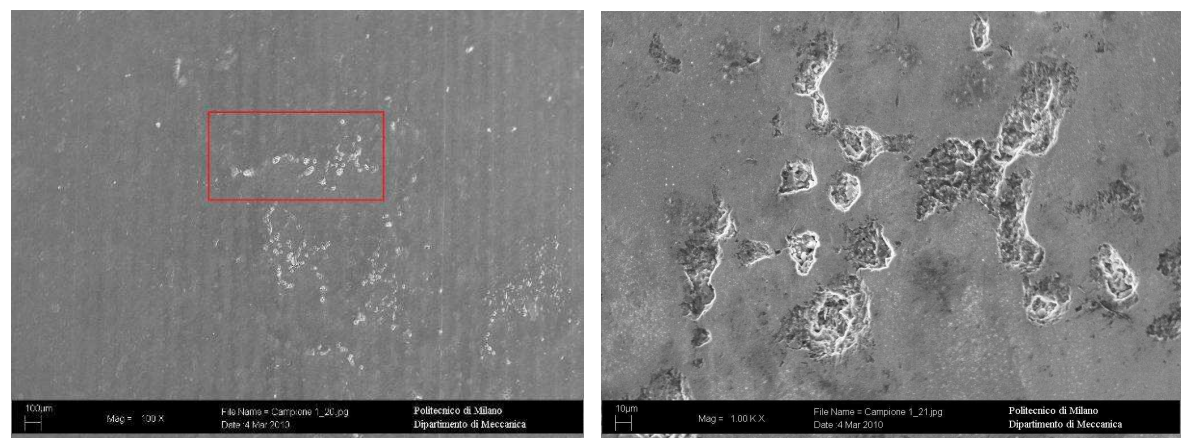
Lontano dai due danni principali, lungo la superficie del campione, si notano molti piccoli difetti superficiali simili a piccole indentazioni.



**Figura 3.14: Piccoli difetti lontani dai danni principali.**



**Figura 3.15: Piccoli difetti lontani dai danni principali.**



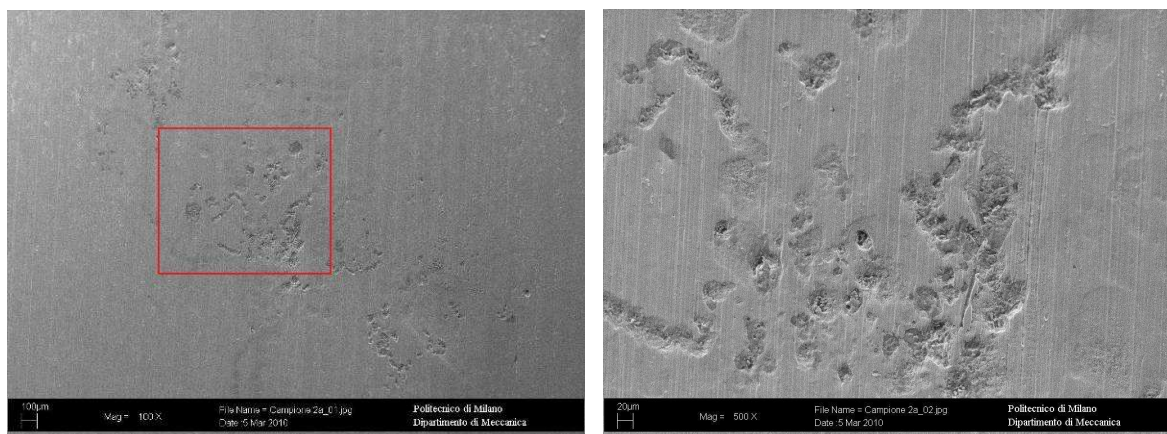
**Figura 3.16: Piccoli difetti lontani dai danni principali.**



## Pista 2 “GS”

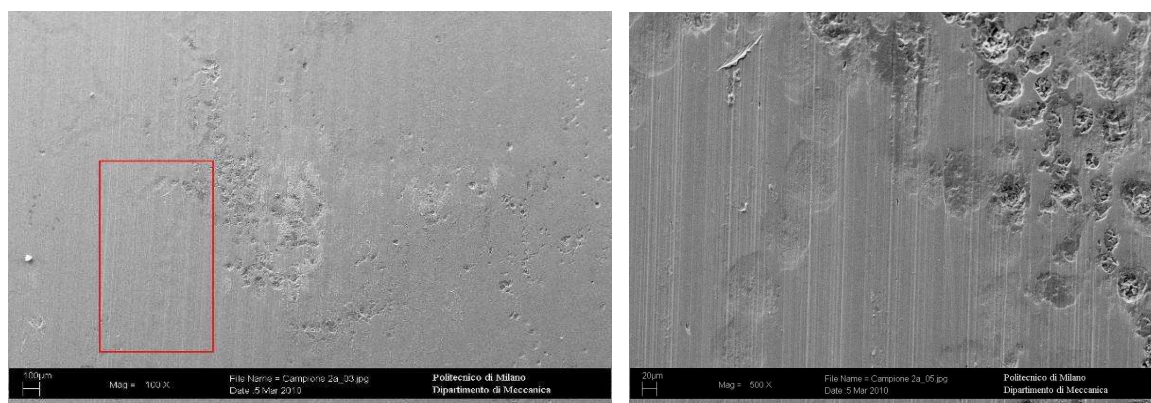
E’ stato preso, lontano da danni principali, un secondo campione dalla pista “GS”.

Anche in questo caso si individuano sulla superficie del campione molti piccoli difetti che sembrano essere orientati casualmente.



**Figura 3.17: Piccoli difetti lontani dai danni principali.**

Parecchi segni simili a rientranze sono rilevabili sulla superficie della pista. Queste rientranze hanno una forma arrotondata e una dimensione paria a circa 100  $\mu\text{m}$ . Probabilmente la comparsa di queste rientranze è collegata al carico applicato sulle sfere dei cuscinetti o ai detriti presenti nel lubrificante.

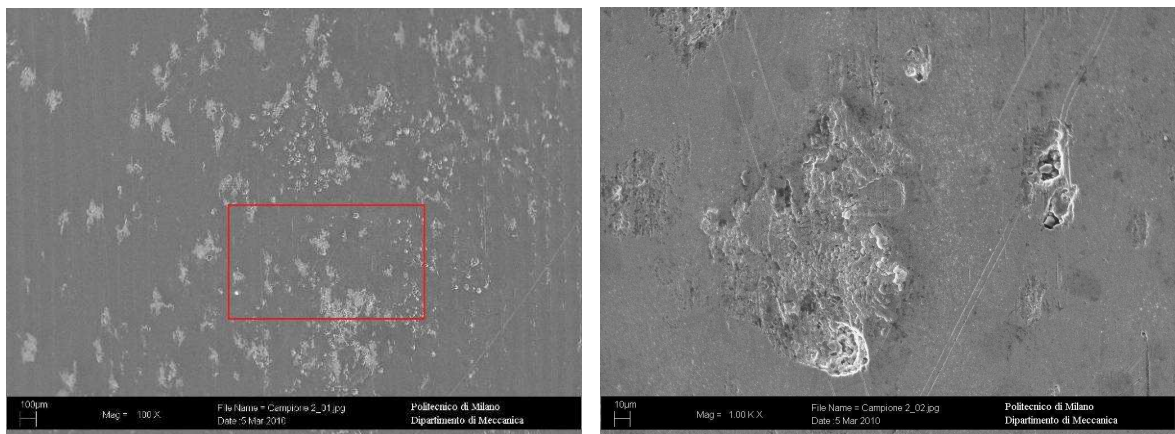


**Figura 3.18: Rientranze individuate sulla pista del cuscinetto.**

## Pista “MS”

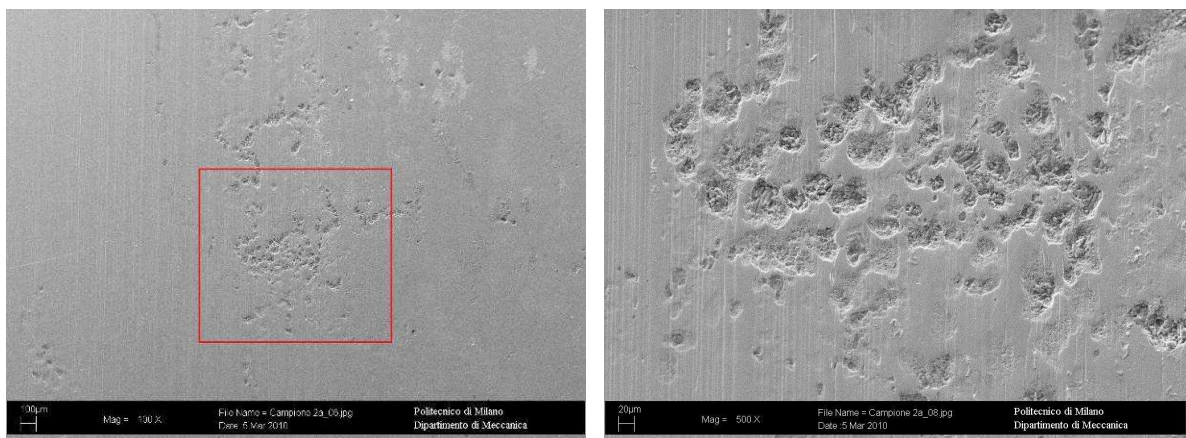
E' stato analizzato lontano da danni principali un terzo campione, appartenente alla pista “MS”.

Anche in questo caso, attraverso l'analisi al SEM, si individuano sulla superficie del campione molti piccoli difetti.



**Figura 3.19: Piccoli difetti della pista “MS” lontani dai danni principali.**

In un'altra posizione, lungo la superficie campione, si notano altri piccoli difetti.



**Figura 3.20: Piccoli difetti della pista “MS” lontani dai danni principali.**

Questi piccoli difetti, individuati sulla superficie del campione, spesso risultano orientati lungo la direzione di rotolamento.

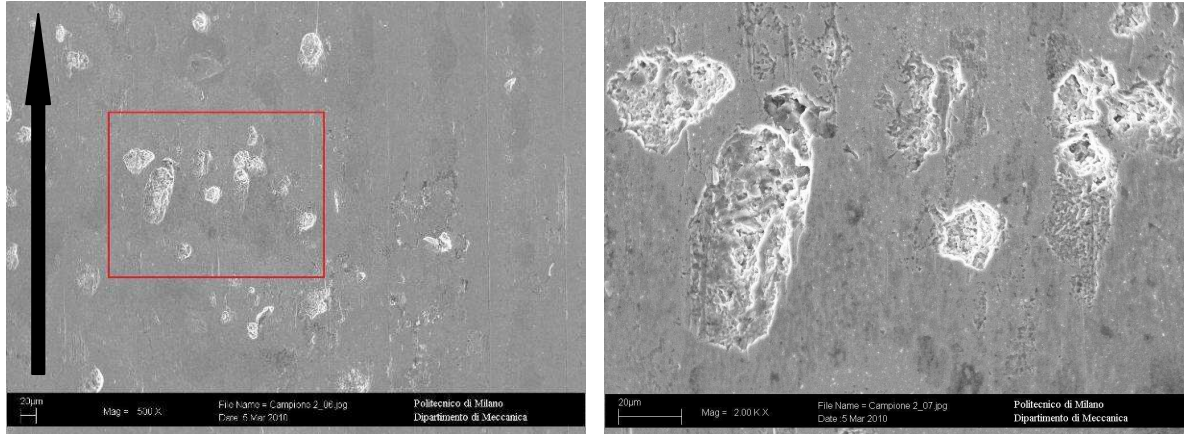


Figura 3.21: Piccoli difetti della pista “MS” lontani dai danni principali.

L’analisi al SEM ha confermato ciò che già era stato visto attraverso l’analisi visiva, ovvero la presenza di due importanti danni sulla pista del cuscinetto lato ingranaggio “GS”. I due danni risultano essere di notevoli dimensioni, hanno una larghezza superiore ad 1 mm, inoltre le immagini ottenute con l’analisi al SEM rivelano una rimozione di detriti in direzione normale a quella di rotolamento.

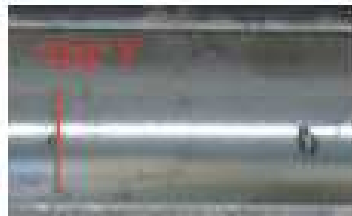
Le immagini mostrano che vicino ai due danni principali si sono propagate, normali alla direzione di rotolamento, delle cricche secondarie. Inoltre l’analisi al SEM ha messo in evidenza la presenza di molti piccoli danni superficiali su entrambe le piste del cuscinetto “GS” e “MS”. Lo svilupparsi di questi danni avviene in direzione casuale.

Queste caratteristiche di guasto sono chiaramente collegate ad un fenomeno da usura da contatto chiamato **flaking**. **Il flaking porta ad un degrado della superficie di contatto, che si estende nella direzione di rotolamento e nella direzione assiale.**

Per capire meglio il meccanismo di danneggiamento, che ha portato a rottura il cuscinetto, sono state analizzate le sezioni trasversali e longitudinali di alcuni campioni.

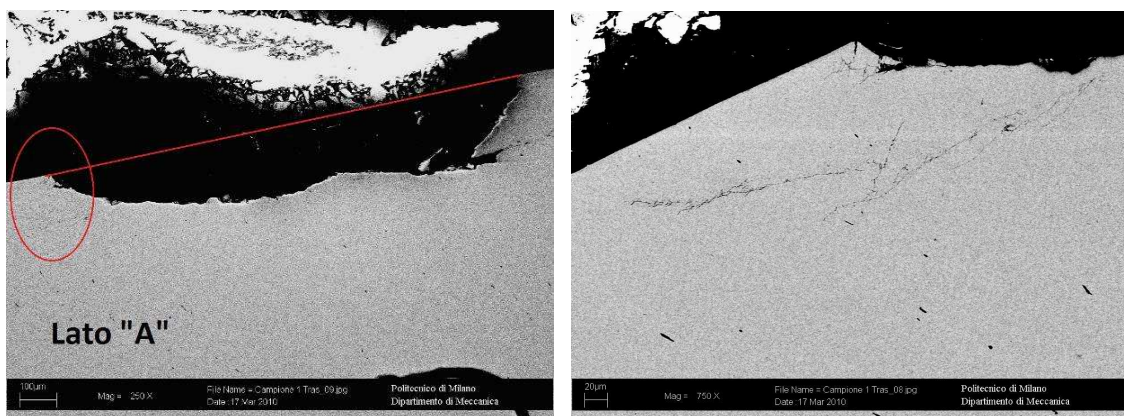
### **Analisi SEM – campione pista “GS” T (trasversale)**

Tra i due i due danni macroscopici presenti sulla superficie della pista “GS”, inizialmente è stata analizzata una sezione trasversale appartenete al **danno macroscopico più piccolo**.



**Figura 3.22: Sezione trasversale in corrispondenza del danno macroscopico più piccolo.**

Dall’analisi al SEM si è osservato che in ingresso “lato A” e in uscita “lato B” della dentellatura, si sono sviluppate, al di sotto della superficie, delle cricche. Queste cricche si sono in seguito propagate nel materiale.



**Figura 3.23: Cricche in ingresso dell’indentazione sviluppatasi al di sotto della superficie.**

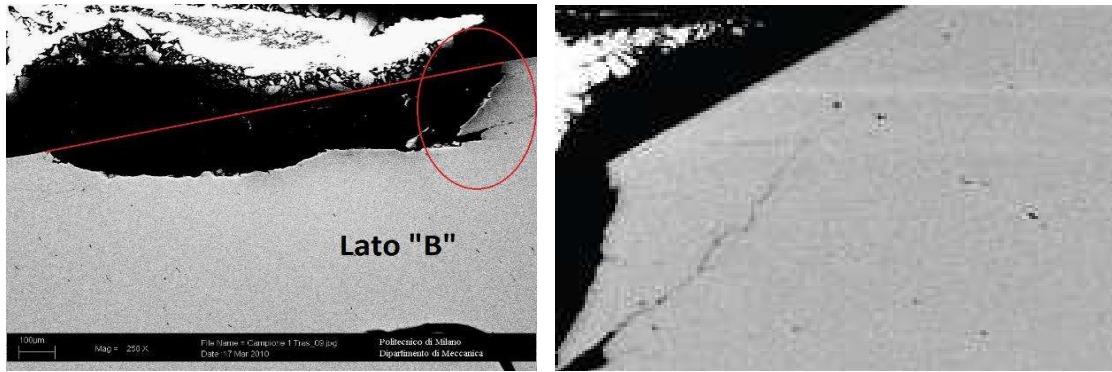


Figura 3.24: Cricche in uscita dell'indentazione sviluppatasi al di sotto della superficie.

### Analisi SEM – campione pista “GS” L (longitudinale)

Proseguendo con l'analisi al SEM è stata studiata una sezione longitudinale del danno macroscopico più grande appartenente alla pista “GS”.

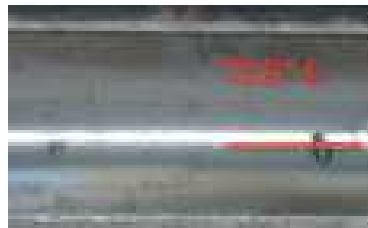


Figura 3.25: Sezione longitudinale in corrispondenza del danno macroscopico più grande.

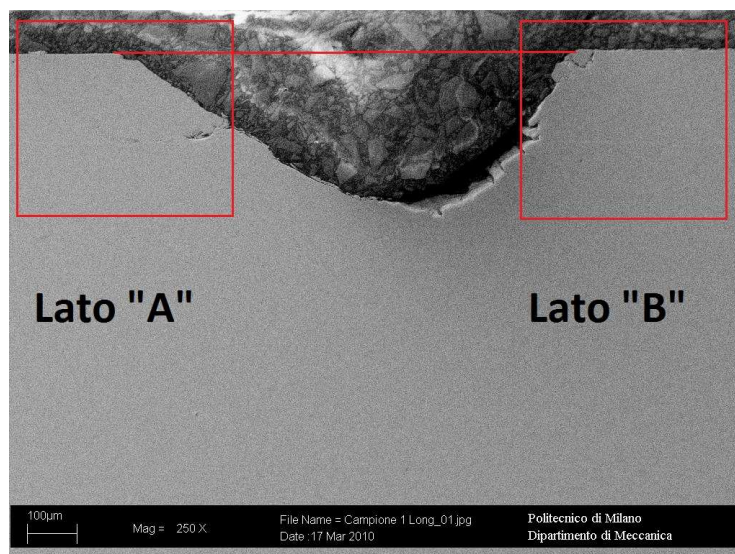
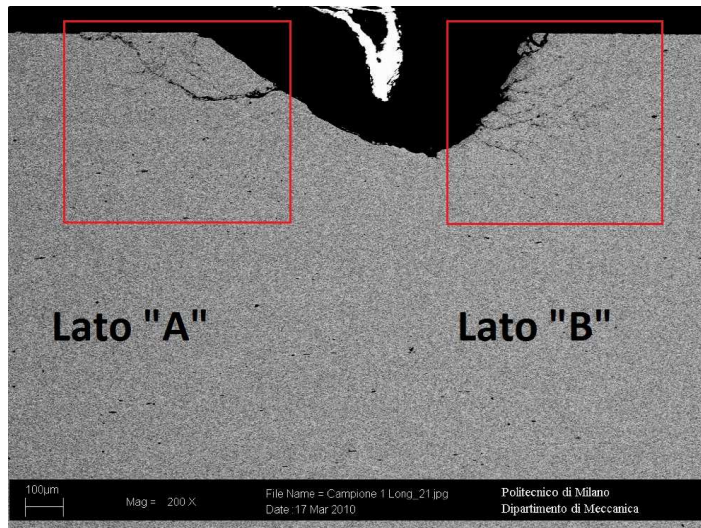


Figura 3.26: Micrografia, ottenuta tramite l'analisi al SEM, della sezione longitudinale del danno più grande.

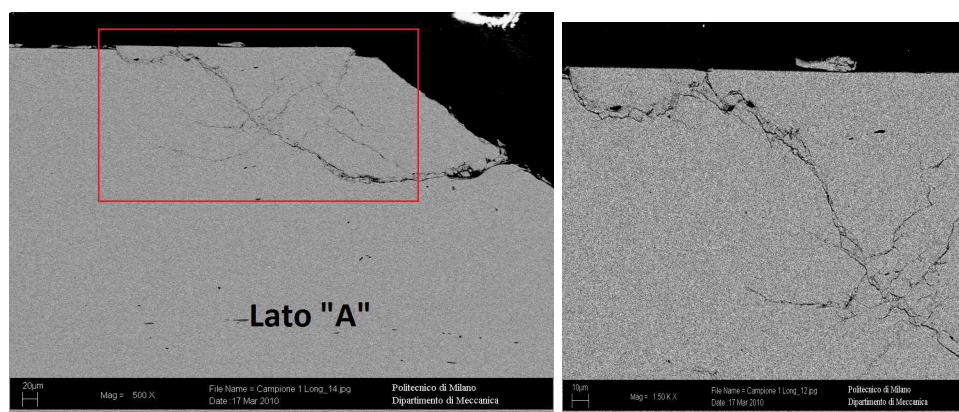


**Figura 3.27: Micrografia, ottenuta tramite l'analisi al QSBD, della sezione longitudinale del danno più grande**

La micrografia del campione ottenuta tramite la tecnica QSBD mette in evidenza che il danneggiamento, intorno al danno principale, risulta essere molto esteso.

### LATO A

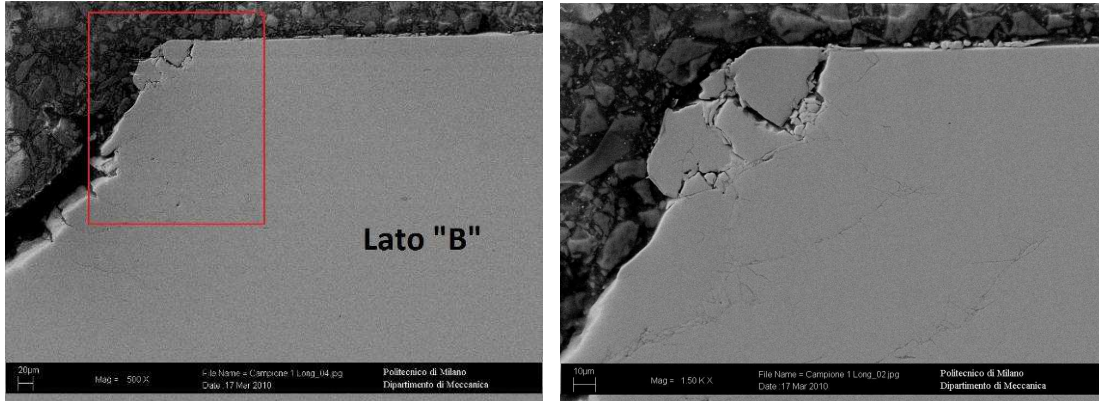
La micrografia mette in evidenza molte cricche al di sotto della superficie del materiale, in corrispondenza del bordo di ingresso dell'indentazione ovvero il lato "A". Il materiale della pista risulta essere quasi scheggiato.



**Figura 3.28: Propagazione delle cricche al di sotto della superficie in corrispondenza del bordo d'ingresso.**

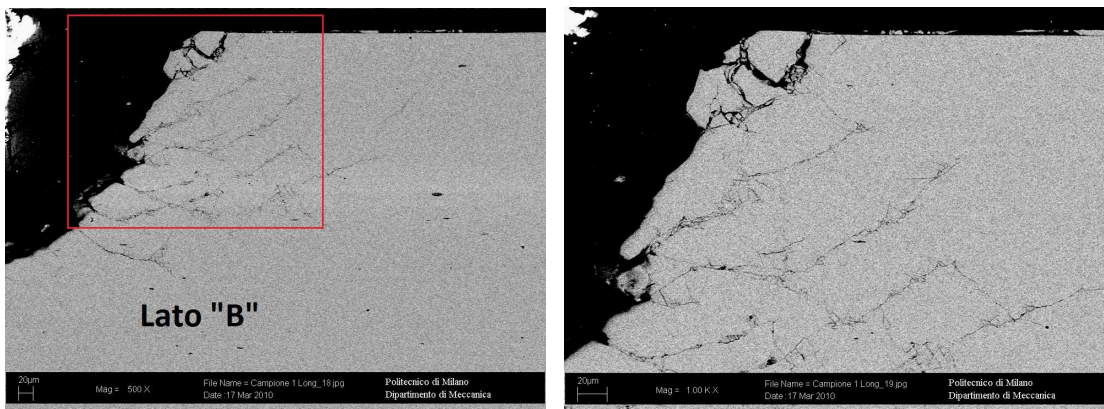
## LATO B

E' stato analizzato il bordo di uscita della indentazione.



**Figura 3.29: Propagazione delle cricche al di sotto della superficie in corrispondenza del bordo d'uscita lato "B".**

Anche in questo caso la micrografia, ottenuta tramite la tecnica QBSD, mette meglio in evidenza le cricche che si sono generate in corrispondenza del bordo d'uscita dell'indentazione, al di sotto della superficie del materiale. Inoltre il materiale della pista risulta essere quasi scheggiato



**Figura 3.30: Propagazione delle cricche al di sotto della superficie in corrispondenza del bordo d'uscita lato "B".**

Attraverso le micrografie ottenute tramite la tecnica QBSD ci si è accorti che i danni al di sotto della superficie del materiale sono più profondi di quanto ci si aspettava.

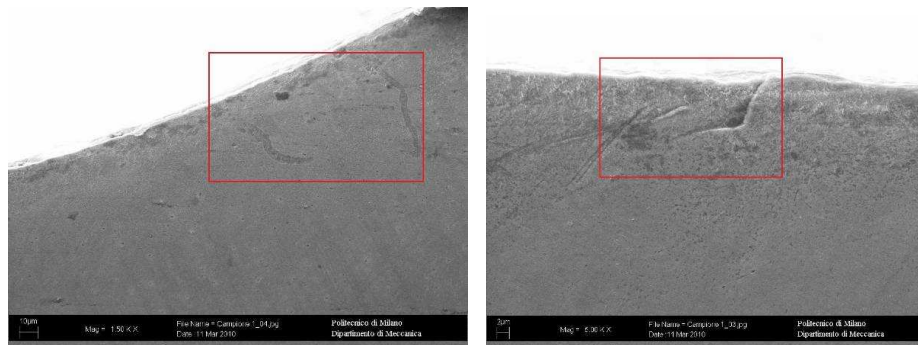
## Analisi SEM – campione pista “GS” L2

Si è preso in esame un campione relativo alla pista “GS”, questa volta però si è analizzata una sezione longitudinale lontana dal danno macroscopico più grande.



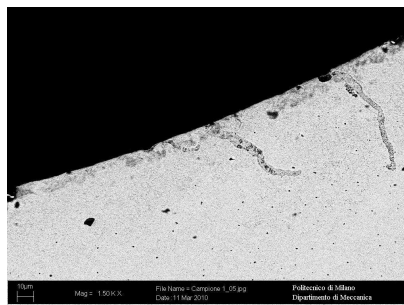
**Figura 3.31: Sezione longitudinale della pista “GS” distante dal danno macroscopico più grande.**

Dall’analisi al SEM si possono individuare lungo la sezione alcune cricche fortemente ossidate.



**Figura 3.32: Cricche ossidate messe in evidenza attraverso una sezione longitudinale della pista “GS”.**

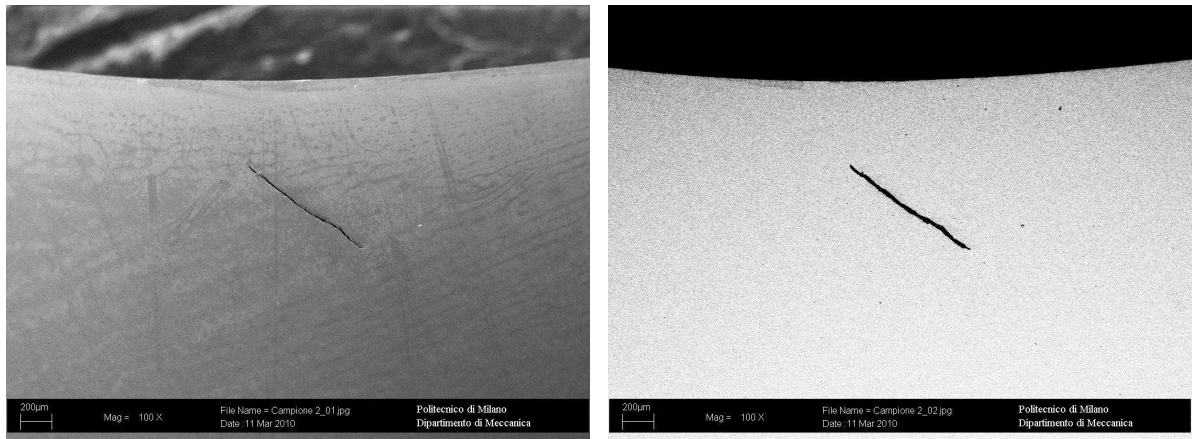
Gli spettri EDS sottolineano la presenza di ossido.



**Figura 3.33: Presenza di ossido nelle cricche.**

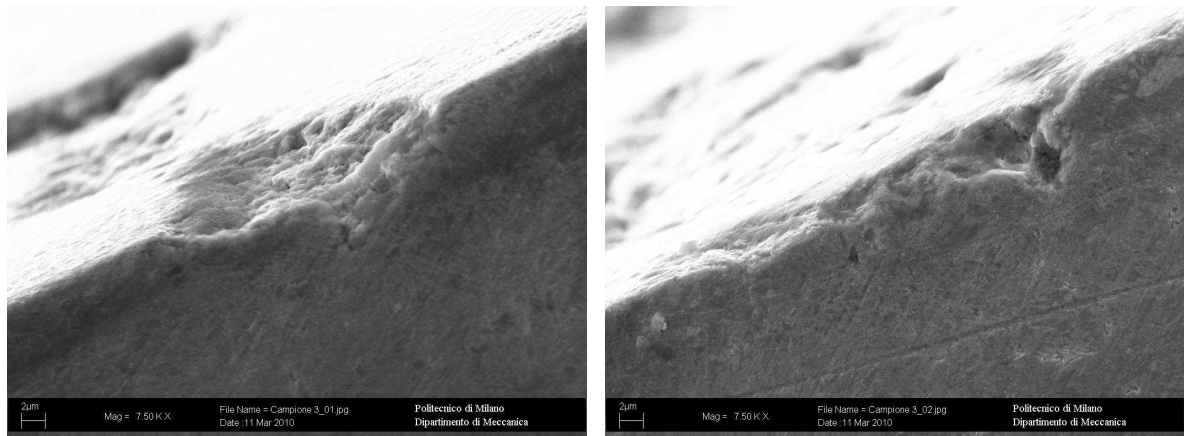


A 0.5 millimetri di profondità, al di sotto della pista “GS” del cuscinetto, è presente una cricca lunga circa 1 mm. La comparsa di questa cricca è probabilmente dovuta all'indurimento della superficie.

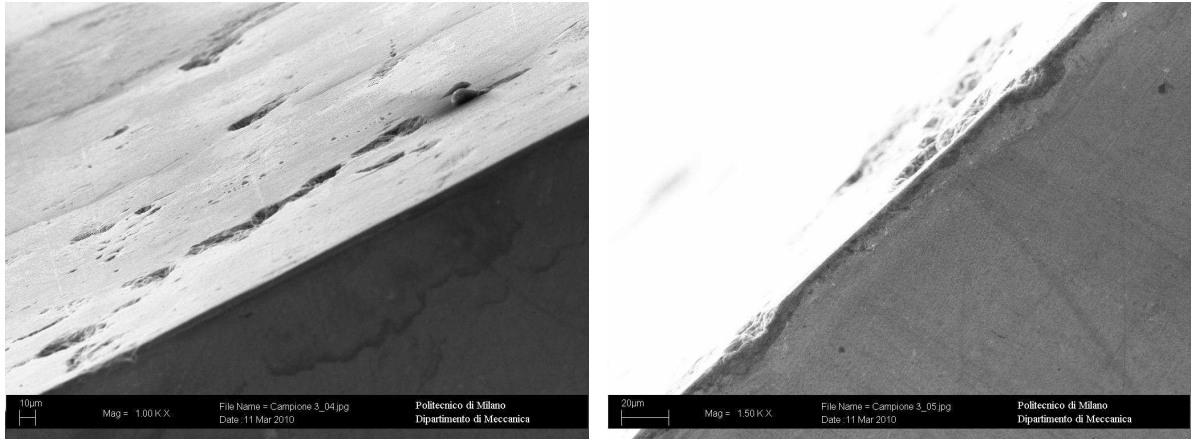


**Figura 3.34: Cricca comparsa al di sotto della superficie della pista “GS”.**

La vista in prospettiva delle immagini ottenute al SEM mettono in evidenza la morfologia dei danneggiamenti superficiali.



**Figura 3.35: Morfologia dei danni appartenenti alla superficie della pista “GS”.**



**Figura 3.36: Morfologia dei danni appartenenti alla superficie della pista “GS”.**

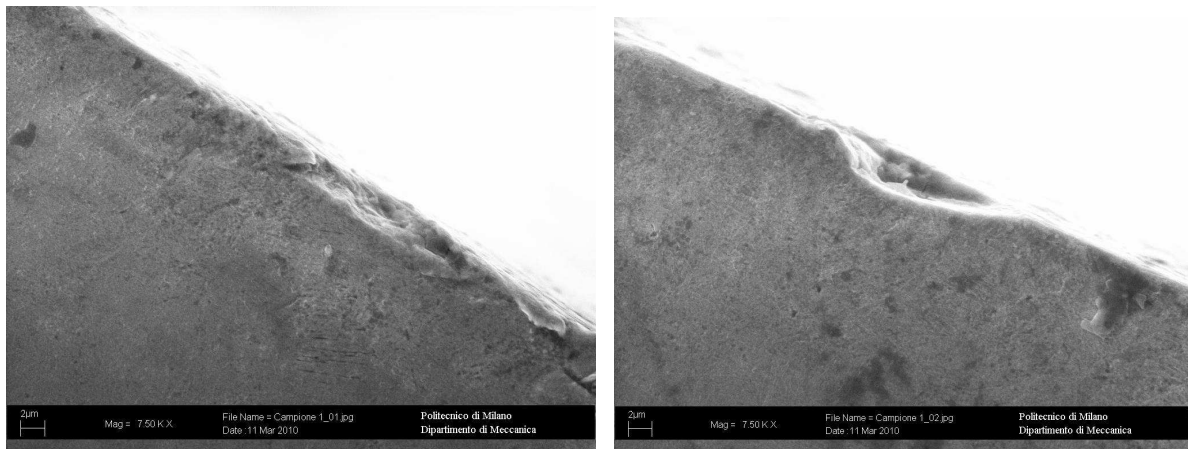
## Analisi SEM – campione pista “MS” L2

Si è preso in esame un campione relativo alla pista “MS”, questa volta però si è analizzata una sezione longitudinale lontana dal danno macroscopico più grande.



**Figura 3.37:** Sezione longitudinale della pista “MS” distante dal danno macroscopico più grande.

La vista in prospettiva delle immagini, ottenute al SEM, mettono in evidenza la morfologia dei danneggiamenti superficiali

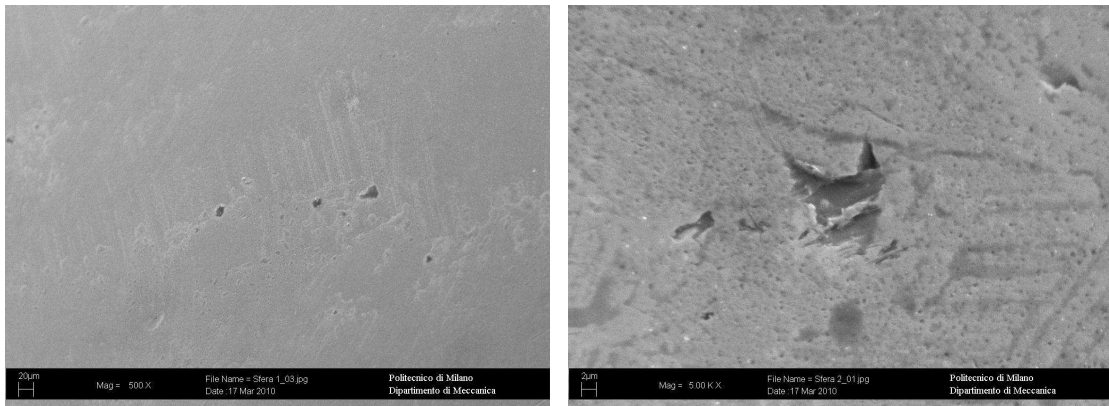


**Figura 3.38:** Morfologia dei danni appartenenti alla superficie della pista “MS”.

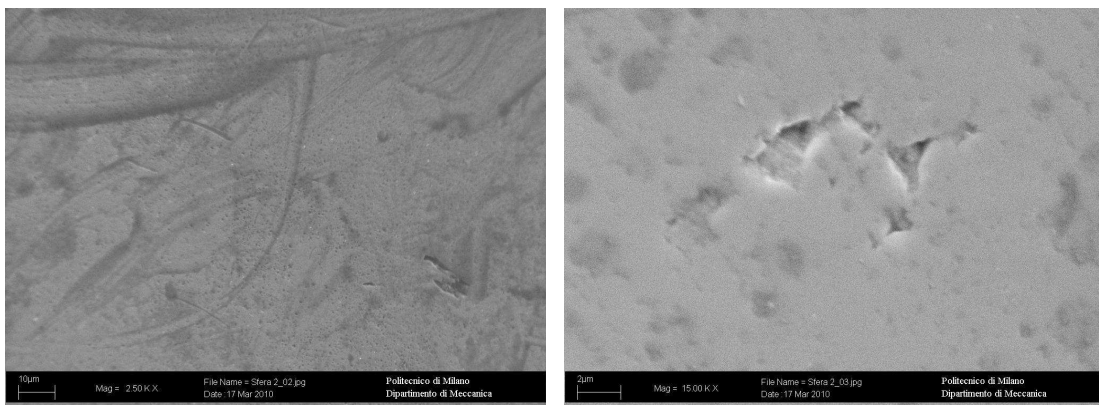
I danneggiamenti superficiali, individuati sulla pista “MS”, sono simili ai danneggiamenti trovati durante le precedenti analisi sulla superficie del campione relativo alla pista “GS”.

### Analisi SEM delle sfere del cuscinetto

Le sfere sono state analizzate al SEM in modo approfondito, nonostante questa analisi accurata sulla loro superficie sono stati individuati solo piccoli difetti.



**Figura 3.39: Piccoli difetti individuati sulla superficie delle sfere.**



**Figura 3.40: Piccoli difetti individuati sulla superficie delle sfere.**

Dall'analisi del campione al SEM si evince che:

- i danni principali osservati ,ovvero le due grandi indentazioni sulla pista “GS”, mostrano la tipica morfologia del flaking;
- molte cricche secondarie, al di sotto della superficie, si sono propagate a causa del fenomeno del Flaking;
- le cricche al di sotto della superficie si ramificano, e la loro estensione è maggiore di quella relativa alle cricche sviluppatesi sulla superficie di rotolamento;
- le morfologie delle cricche osservate possono essere collegate al fenomeno chiamato “Sfaldamento dell’ammaccatura” o “Dent Flaking”;
- molti altri piccoli difetti come i buchi e i segni delle indentazioni (pit e indentation marks) sono presenti su entrambe le superfici delle due piste analizzate “GS” e “MS”;
- questi segni devono essere considerati come il primo stadio di un largo danneggiamento superficiale;
- una singola cricca è stata individuata sulla pista “GS” al di sotto della superficie; probabilmente questa cricca si è sviluppata durante il processo di indurimento superficiale e quindi non è da considerarsi collegata con i danni osservati in superficie;
- non si sono osservati importanti difetti sulla superficie delle sfere appartenenti al cuscinetto.

### 3.2.3 Analisi metallografica

#### Analisi metallografica – campione pista “GS” T

L’analisi metallografica svolta su una sezione **trasversale**, appartenente al campione della pista “GS”, mette in evidenza uno strato superficiale indurito. La microstruttura, ottenuta tramite tempra, è costituita da martensite.

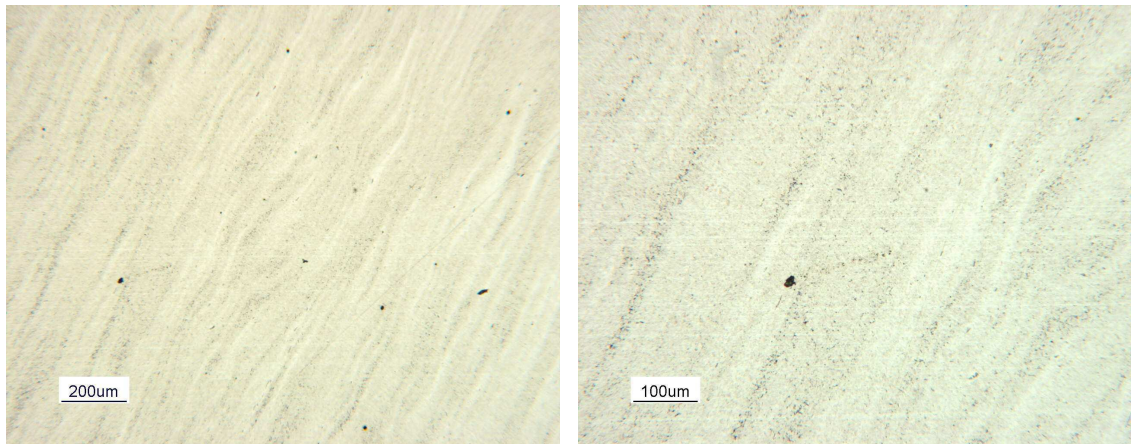


Figura 3.41: Ingrandimento dello strato superficiale indurito.

Lo strato di microstruttura temprata è chiaramente visibile soprattutto se si è utilizzata una tempra ad induzione.

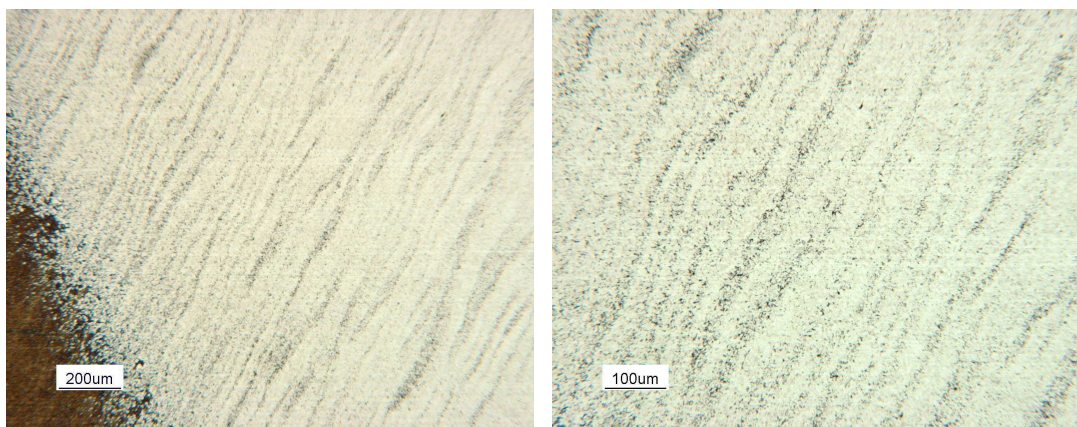
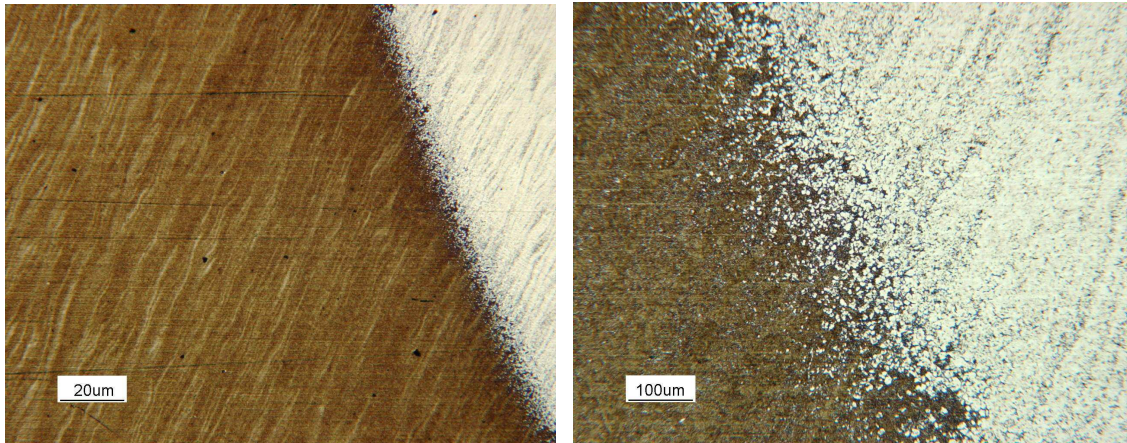
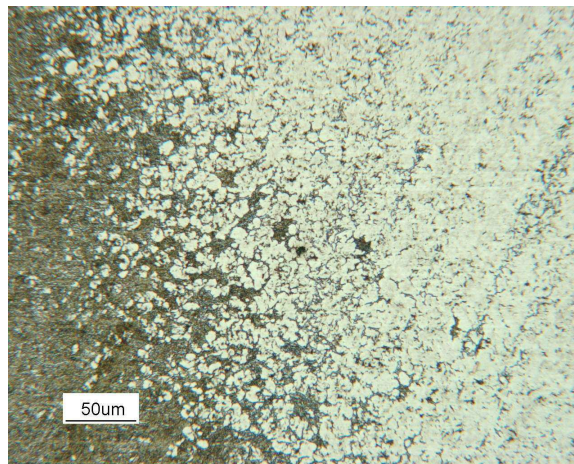


Figura 3.42: Ingrandimento dello strato superficiale indurito.

Nelle seguenti immagini si mette in evidenza l'interfaccia tra lo strato superficiale indurito, caratterizzato da martensite temprata, e la restante parte di materiale.



**Figura 3.43: Interfaccia tra lo strato indurito e il restante materiale.**



**Figura 3.44: Martensite temprata.**

Attraverso l'analisi metallografica, del campione relativo alla pista "GS", si osserva che non sono presenti difetti metallurgici in prossimità del danneggiamento macroscopico principale.

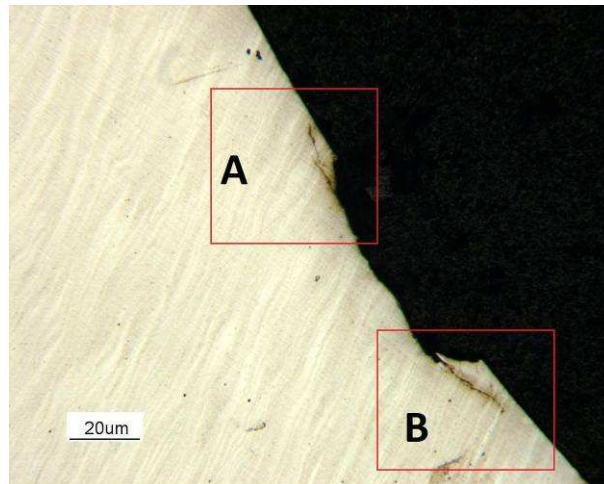


Figura 3.45: Sezione trasversale del danno principale.

La microstruttura dello strato indurito risulta essere perpendicolare alla pista "GS" di rotolamento del cuscinetto.

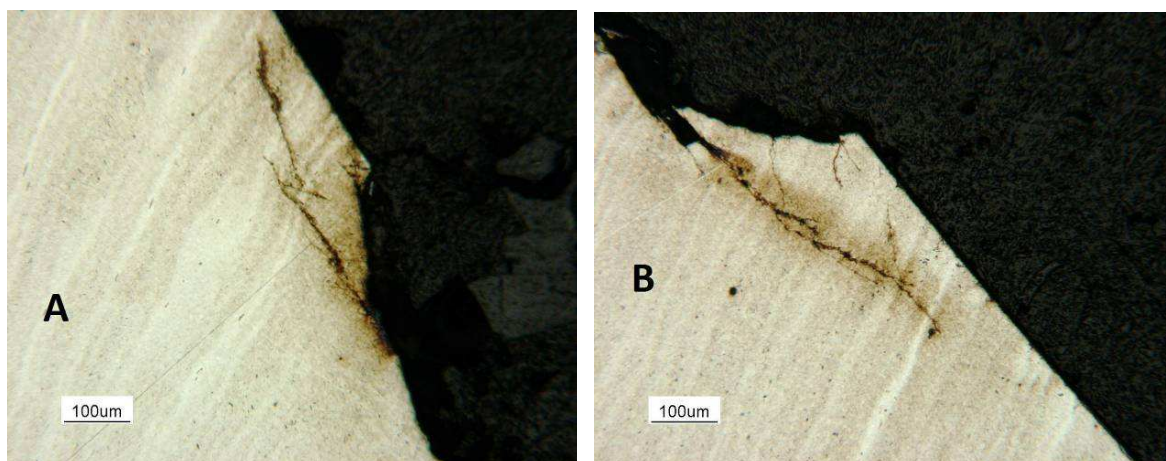


Figura 3.46: Microstruttura perpendicolare alla pista "GS".



### Analisi metallografica – campione pista “GS” L

L’analisi metallografica svolta su una sezione **longitudinale**, appartenente al campione della pista “GS”, mette in evidenza uno strato superficiale indurito. La microstruttura, ottenuta tramite tempra, è costituita da martensite.

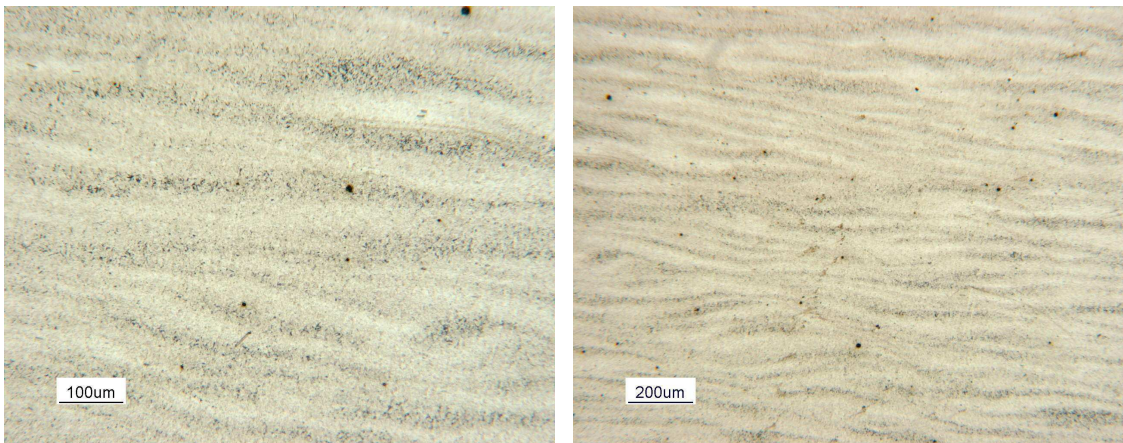


Figura 3.47: Ingrandimento dello strato superficiale indurito.

Nelle seguenti immagini si mette in evidenza l’interfaccia tra lo strato superficiale indurito, caratterizzato da martensite temprata, e la restante parte di materiale.

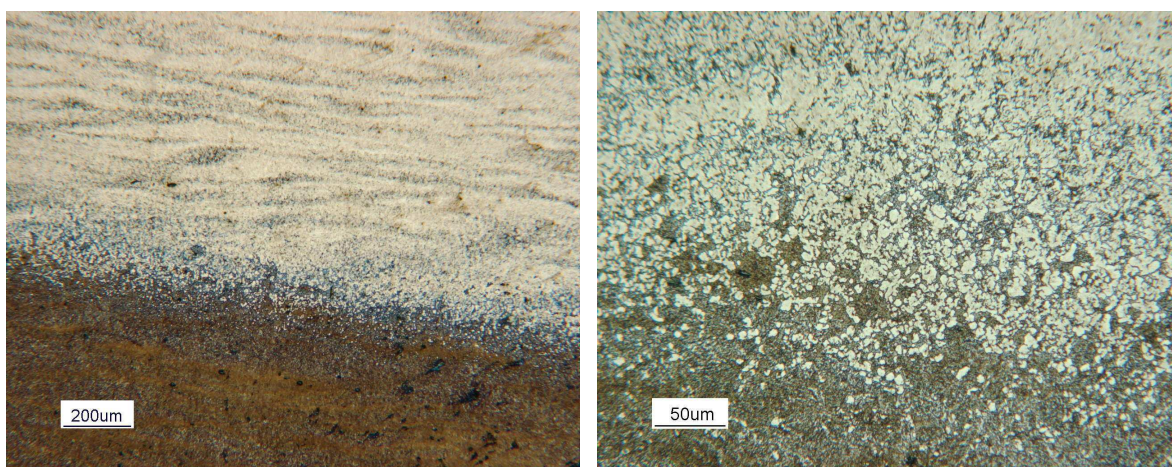


Figura 3.48: Interfaccia tra lo strato indurito e il restante materiale.

Analizzando la sezione longitudinale si nota che non sono presenti anomalie metallurgiche in prossimità del danneggiamento macroscopico principale.

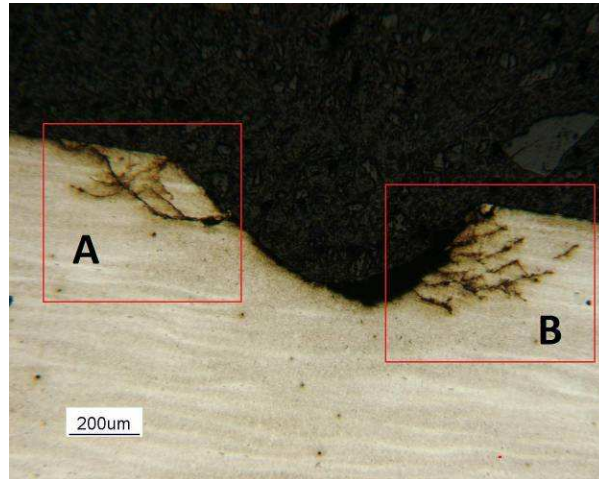


Figura 3.49: Sezione longitudinale del danno principale.

La microstruttura dello strato indurito risulta essere parallela alla pista “GS” di rotolamento del cuscinetto.

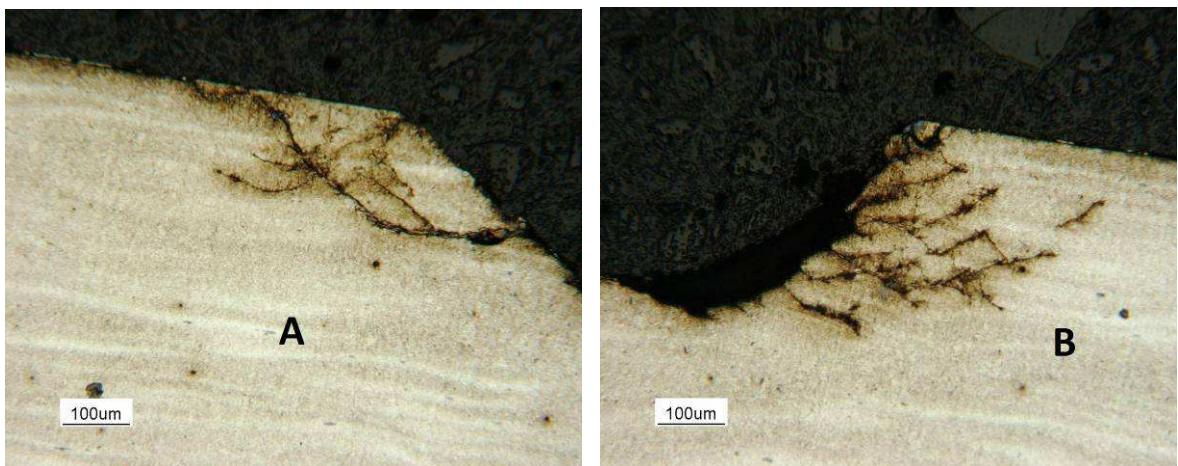


Figura 3.50: Microstruttura parallela alla pista “GS”.

Si nota, attraverso un elevato ingrandimento della sezione longitudinale, che all'interno delle bande più chiare sono presenti i solfuri di manganese.

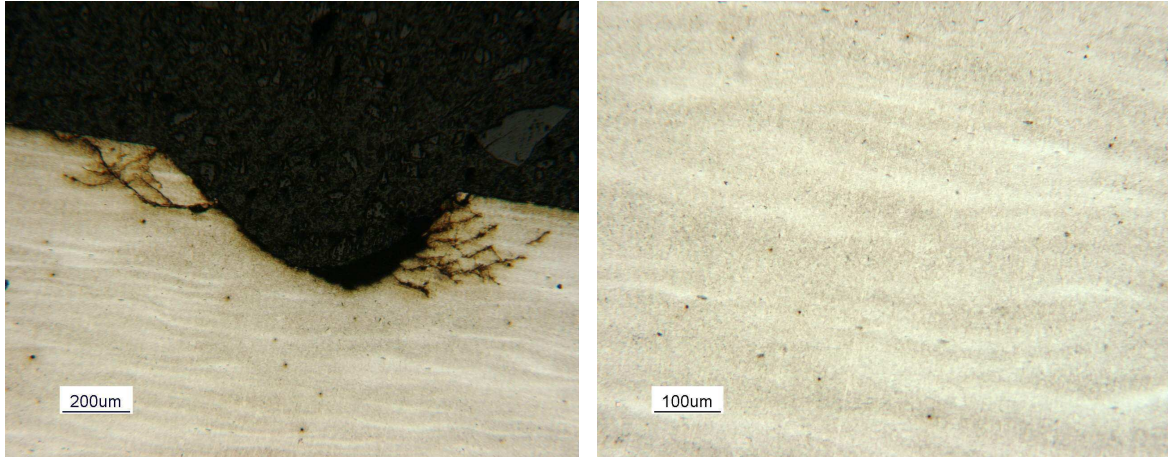


Figura 3.51: Concentrazione di solfuri di manganese.

### Analisi metallografica – campione pista “GS” L2

È stata svolta un'analisi metallografica su una seconda sezione **longitudinale** appartenente al campione della pista “GS”. Anche in questa analisi si nota che lo strato superficiale è indurito e che la microstruttura, ottenuta tramite tempra, è costituita da martensite.

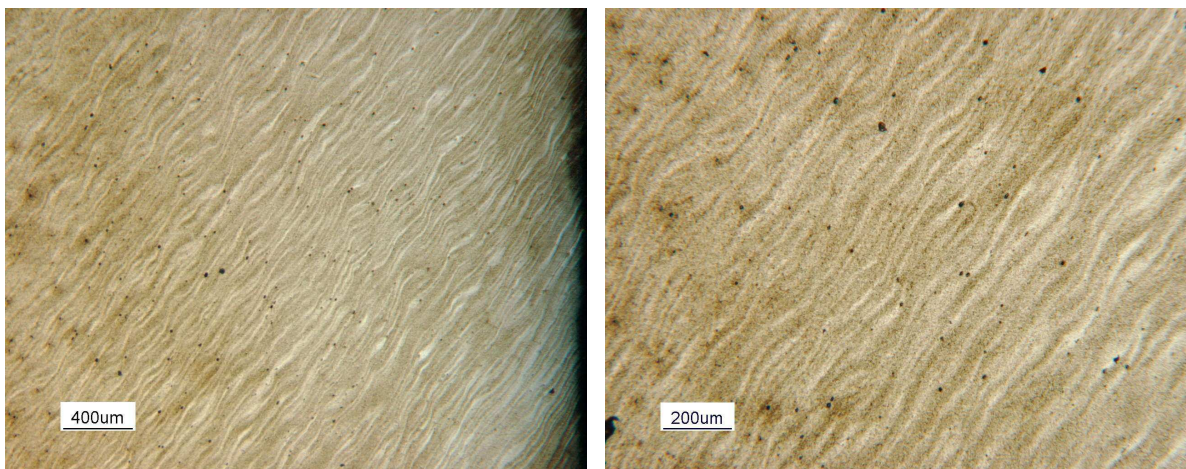
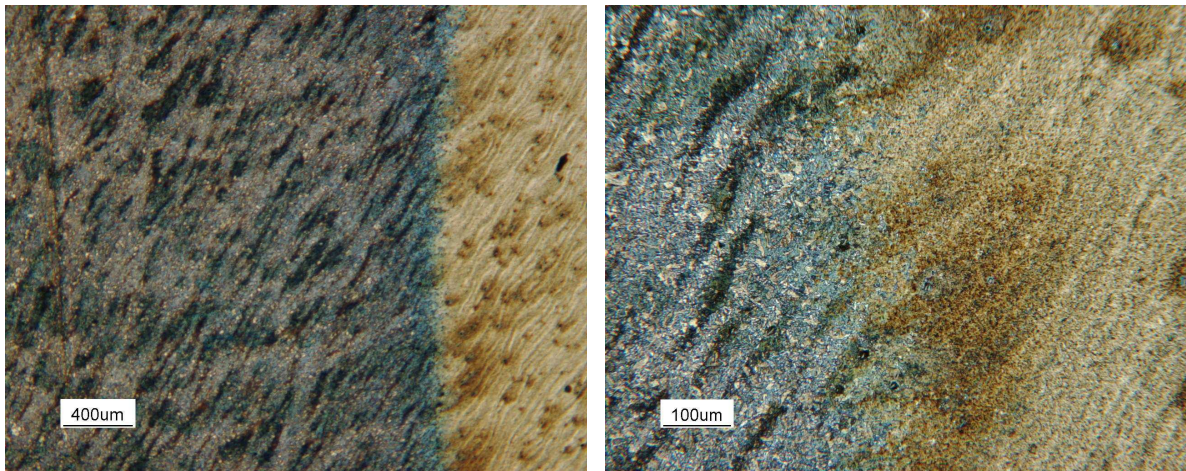


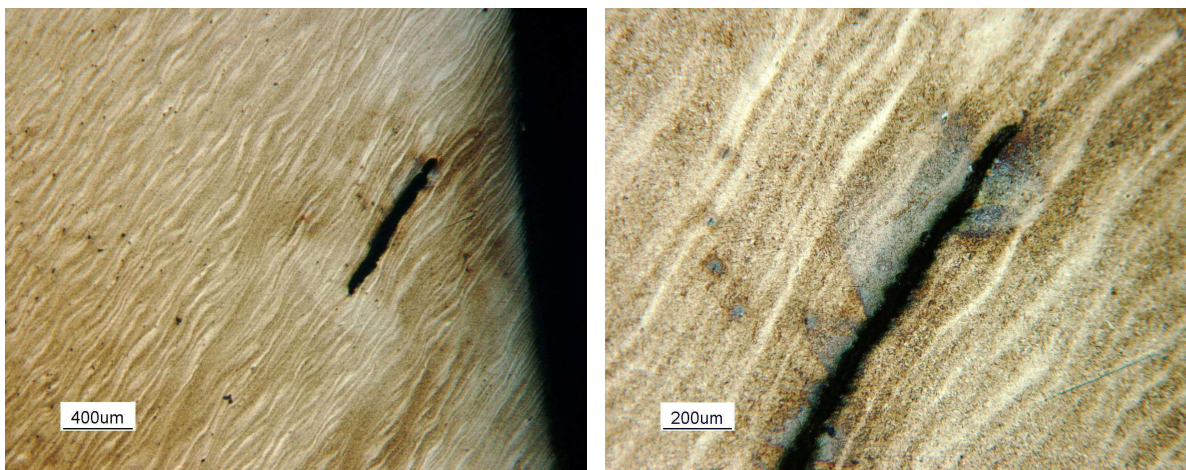
Figura 3.52: Ingrandimento strato superficiale indurito.

Nelle seguenti immagini si mette in evidenza l'interfaccia tra lo strato superficiale indurito, caratterizzato da martensite temprata, e la restante parte di materiale.



**Figura 3.53: Interfaccia tra lo strato indurito e il restante materiale.**

Di seguito si riportano le immagini relative alla cricca, al di sotto della pista “GS” del cuscinetto, già osservata in precedenza.

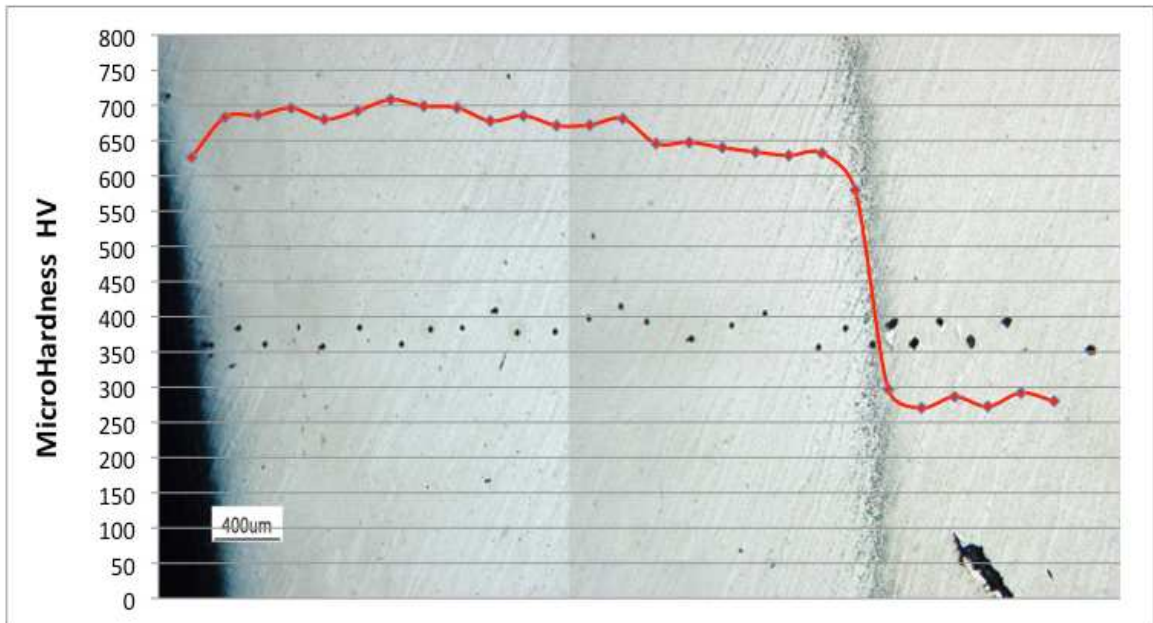


**Figura 3.54: Cricca presente al di sotto della superficie di rotolamento della pista “GS”. La cricca è lunga circa 1 mm.**

### 3.2.4 Test di microdurezza

La durezza di un materiale è una misura della resistenza alla deformazione plastica di esso. Anche intuitivamente si arguisce che un materiale “duro” soggetto a strisciamento con un altro, tenderà ad usurarsi meno di uno più “tenero”. Esistono diversi test che permettono di misurare la durezza di un materiale, determinando la resistenza offerta da questo lasciarsi penetrare da un corpo. Sul cuscinetto è stata effettuato il test di micro durezza Vickers.

Dopo aver effettuato il test sul provino il profilo di microdurezza che si è ottenuto ha un andamento tipico dei componenti temprati ad induzione.



### 3.2.5 Analisi chimica

Lo scopo dell'analisi chimica dei materiali metallici è quello di determinarne la composizione e quindi la classificazione secondo una norma di riferimento.

Sono state fatte due analisi sulla composizione chimica del cuscinetto, i valori ottenuti da entrambe le analisi, sono in accordo con i valori standard che caratterizzano il 47CrMo4.

Tabella 3.1: Analisi chimica del cuscinetto.

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
0.47	0.23	0.71	0.008	0.014	1.09	0,13
<b>Mo</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>As</b>
0.17	0.022	0.19	0.017	0.005	0.006	0.007

Quantometric analysis (Politecnico laboratory)

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
0.47	0.21	0.69	0.009	0.013	1.06	0.12
<b>Mo</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>As</b>
0.18	0.020	0.21	0.016	0.003	0.005	0.006

Quantometric analysis (Hammer laboratory)

Dall'analisi metallografica si evince che:

- la microstruttura dell'acciaio, ottenuta tramite una tempra ad induzione, è martensite. La microstruttura è fortemente bandeggiata e può essere migliorata notevolmente scegliendo produttori di acciaio migliori;
- sulla pista del cuscinetto e vicino ai danni principali non è stato rilevato nessun difetto metallurgico. Soltanto piccole inclusioni di solfuri di manganese sono presenti negli strati bianchi della microstruttura;
- l'indurimento a induzione mi restituisce una profondità di durezza conforme con i valori standard per quell'acciaio. Il profilo di microdurezza visualizza valori medi di durezza intorno a 650-700 HV con una profondità di circa 4.5 millimetri;

- la composizione chimica risponde completamente alla norma europea per l'acciaio 47CrMo4.

### 3.2.6 Analisi degli sforzi residui

Sono stati misurati gli sforzi residui, essi risultano essere di compressione lungo tre direzioni e sono coerenti con gli sforzi hertziani di contatto applicati sulla pista di rotolamento del cuscinetto.

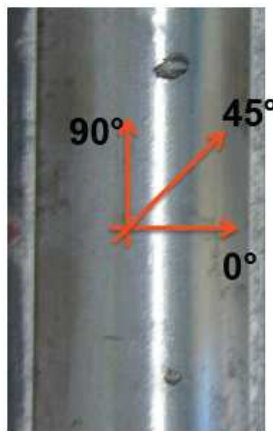


Figura 3.56: Direzioni principali degli sforzi.

Lungo la direzione 0° gli sforzi residui di compressione sono più del doppio rispetto a quelli nella direzione di 90°: questi dati spiegano soddisfacentemente bene il perché di un elevato sforzo assiale.

Direzione	0°	45°	90°
Sforzo [MPa]	- 1311 ± 32.8	-896.2 ± 36.6	-530.05 ± 21.7

### **3.3 Fenomeno del flaking**

E' stato osservato che il modo di rottura può essere collegato al danneggiamento da flaking della pista di rotolamento e successivo pitting.

Il flaking si verifica quando piccole parti di materiale del cuscinetto si staccano dalla superficie liscia della pista, oppure quando si ha il distaccamento di pezzi di materiale dai corpi volventi per motivi riconducibili ad affaticamento da rotolamento. Si vanno così a sviluppare regioni che hanno una struttura ruvida e grossolana.

Le possibili cause relative alla nascita del flaking potrebbero essere state:

- eccessivo carico;
- montaggio sbagliato, cattivo allineamento;
- ingresso di residui esterni;
- penetrazione dell'acqua;
- lubrificazione sbagliata o lubrificante improprio;
- rimozione inadatta del cuscinetto;
- precisione impropria dell'albero o dell'alloggiamento;
- irregolarità nella rigidità dell'alloggiamento;
- lo sviluppo della ruggine;
- pozzi formati dalla corrosione;
- ammaccature.



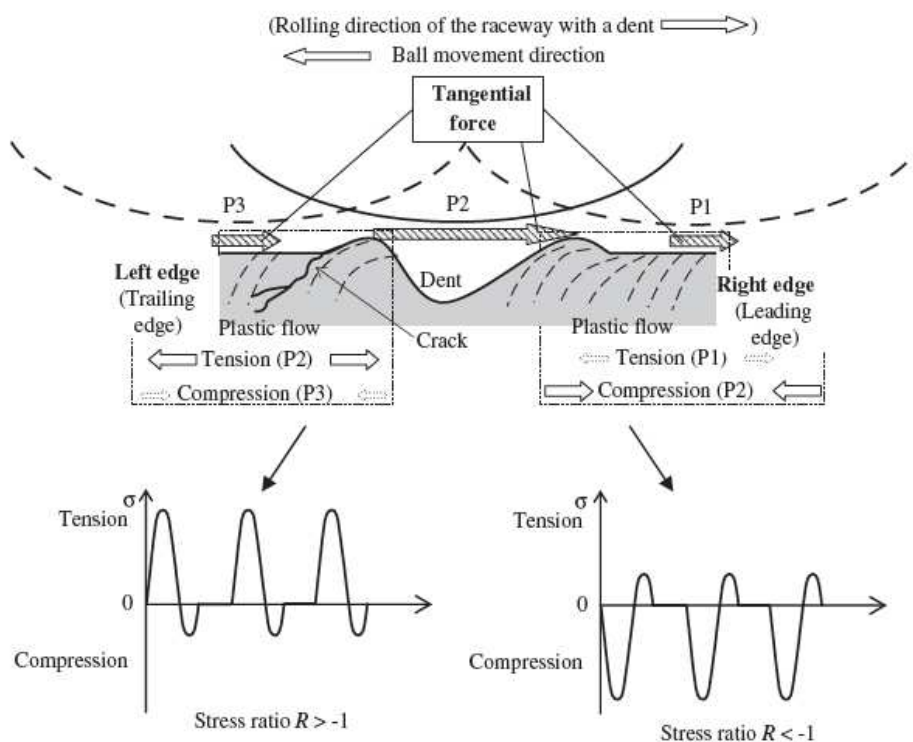


Figura 3.57: Azione degli sforzi sui bordi dell'ammaccatura.

Il flaking tende ad accadere sul bordo di un'ammaccatura a causa del passaggio, sopra l'ammaccatura, della sfera e conseguentemente del carico. Per via del rigonfiamento di materiale in questa zona (P2), si genera una grande forza tangenziale sul bordo dell'ammaccatura. La stessa forza tangenziale è quella che provoca lo scorrimento plastico del materiale intorno all'ammaccatura.

Se la forza tangenziale è generata da sinistra a destra, un grande sforzo di trazione nasce sul bordo sinistro dell'ammaccatura e un grande sforzo di compressione nasce sul bordo destro dell'ammaccatura.

In presenza di un'ammaccatura, sul bordo sinistro del dente lo sforzo di trazione che si genera all'ingresso dell'area di contatto (P2) diventa più grande dello sforzo di compressione generato in uscita dall'area di contatto (P3). Questo perché la forza tangenziale diventa grande sul bordo della ammaccatura. Tuttavia, a destra del bordo della ammaccatura lo sforzo di

compressione generato all'uscita dell'area di contatto (P2) diventa più grande della sforzo di trazione generato all'ingresso dell'area di contatto (P1).

Il grafico seguente mostra l'andamento degli sforzi ciclici di tensione e compressione, relativi alla forza tangenziale, che si generano su entrambi i bordi dell'ammaccatura a causa del passaggio del carico.

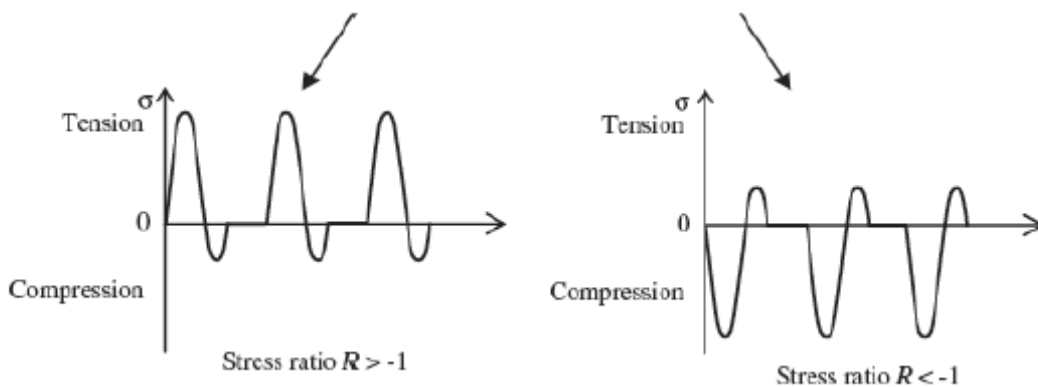


Figura 3.58: Andamento del ciclo di tensione-compressione.

Si indica con  $R$  il rapporto di fatica degli sforzi ciclici,  $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ . Sul bordo sinistro dell'ammaccatura il rapporto degli sforzi ciclici vale  $R > -1$ , mentre sul bordo destro dell'ammaccatura il rapporto degli sforzi ciclici vale  $R < -1$ .

Anche a parità di carico applicato, la vita a fatica associata per un rapporto di sforzi  $R > -1$  è più breve rispetto alla vita a fatica associata per un rapporto di sforzi  $R < -1$ .

Quindi, si evince che, una crepa iniziata sull'angolo sinistro dell'ammaccatura si propaga facilmente fino a causare la flaking failure.

L'ammaccatura da inizio allo sfaldamento tramite il seguente processo:

- poiché esiste un rigonfiamento, una grande forza tangenziale è generata al bordo dell'ammaccatura e un grande lo scorrimento plastico si presenta sul bordo dell'ammaccatura.

- a causa dell'influenza della forza tangenziale, iniziano le cricche per fatica dal bordo dell'ammaccatura dove è stato generato un grande sforzo di trazione.
- la propagazione per fatica delle cricche avviene attraverso lo sforzo di taglio e lo sforzo di trazione, dovuto dall'effetto dell'olio che penetra nella cricca, inizia così il flaking.

Molti fattori influenzano la vita del guasto:

- massimo carico applicato;
- la presenza di sforzi tangenziali;
- la velocità di rotazione;
- la dimensione delle ammaccature;
- In modo particolare la velocità di rotazione influenza le condizioni del film d'olio e aumenta a temperatura con cui i componenti del cuscinetto lavorano.

## 4 Conclusioni

Il guasto studiato, verificatosi sul dispositivo della ruota, deve certamente essere attribuito ad un fenomeno da usura da contatto che assume il nome di flaking.

Le analisi condotte sulle piste del cuscinetto mostrano la presenza di due danni macroscopici, con larghezza superiore ad 1 mm, e molti piccoli danni superficiali disposti casualmente sulla superficie. I danneggiamenti di dimensioni minori devono essere considerati come un campanello d'allarme, ovvero vanno considerati come se fossero danni da flaking al primo stadio di propagazione.

E' stata condotta anche un'analisi sulla composizione chimica dell'acciaio utilizzato per la realizzazione del cuscinetto. La composizione chimica dell'acciaio corrisponde a quella prevista per il tipo di acciaio utilizzato.

L'analisi metallografica ha permesso di verificare la microstruttura dell'acciaio del cuscinetto; attraverso questa analisi si nota che la microstruttura dello strato superficiale, indurito tramite una tempra ad induzione, è martensite.

Nessun difetto metallurgico è stato rilevato sulla pista del cuscinetto e, in particolar modo, vicino ai danneggiamenti di dimensioni maggiori. Si notano solo solfuri di manganese presenti nella struttura bandeggiata del componente (bande di colore più chiaro).

La microstruttura risulta essere fortemente bandeggiata. Essa è tipica dei prodotti realizzati tramite colata continua, tale problematica può essere controllata utilizzando acciai prodotti con parametri di colata specifici.

I profili di micro durezza realizzati sul campione evidenziano una profondità di tempra conforme con i valori standard. I valori medi di durezza ottenuti sono compresi tra 650-700 HV.

Il fenomeno del flaking probabilmente è da mettere in relazione con gli alti carichi applicati e/o all'alta velocità di rotazione della trasmissione che provoca l'innalzamento della temperatura. Va notato, che quando si applicano carichi minori o la macchina ha velocità minori, questi dispositivi nelle ruote non sono soggetti al fenomeno di danneggiamento chiamato Flaking.

Dalla letteratura scientifica si evince che i problemi osservati, durante la nostra ricerca, si verificano quando i carichi applicati sono elevati oppure quando le condizioni di lubrificazione non sono ottimali:

- temperatura elevata con conseguente diminuzione di viscosità;
- presenza di inquinanti.

Per evitare che si verifichi il fenomeno del flaking si propone l'utilizzo di un lubrificante più efficiente oppure un sistema di controllo dei residui contaminanti presenti all'interno dell'olio; un'altra raccomandazione può essere quella di andare a ridurre il carico che grava sul cuscinetto .

Si consiglia inoltre, quando è possibile, la riduzione della velocità di rotazione. In questo modo si evita di raggiungere temperature di esercizio troppo elevate che vanno ad alterare le condizioni del lubrificante (diminuisce la sua viscosità).

Se le raccomandazioni precedenti relative all'utilizzo di lubrificanti più performanti, alla riduzione della velocità di rotazione e alla riduzione del carico applicato non sono realizzabili, si suggerisce di verificare il disegno del componente e/o di utilizzare un materiale differente, oppure sottoporre a un differente trattamento la superficie del componente.

## Bibliografia

### Articoli

- Yusuf Kayah, Ismail Uzun, Kubilay Aslantas “Contact Fatigue Failure of a Tapered Roller Bearing Used in a Lorry Wheel” Published online 27 March 2009, ASM International 2009.
- Michael N. Kotzalas, Tedric A. Harris “Fatigue Failure Progression in a Ball Bearings” Vol. 123, April 2001 Copyright 2001 by ASME Transactions of the ASME.
- R. S. Sayles E. Loannides “Debris Damage in Rolling Bearings and its Effects on Fatigue Life” Vol. 110, January 1998 Copyright 1988 by ASME Transactions of the ASME.
- T. Ueda, N. Mitamura “Mechanism of dent initiated flaking and bearing life enhancement technology under contaminated lubrication condition”, Part I : Effect of tangential force on dent initiated flaking, Available online 20 March 2008, Tribology International 41 (2008) 965 – 974, 2009 Elsevier Ltd. All reserved.
- T. Ueda, N. Mitamura “Mechanism of dent initiated flaking and bearing life enhancement technology under contaminated lubrication condition”. Part II: Effect of rolling element surface roughness on flaking resulting from dents, and life enhancement technology of rolling bearings under contaminated lubrication condition, Available online 8 January 2009, Tribology International 42 (2009) 1832 – 1837, 2009 Elsevier Ltd. All reserved.
- Yukio Fujii, Kikuo Maeda “Flaking failure in rolling contact fatigue caused by indentation on mating surface (I), Reproduction of flaking failure accompanied by cracks extending bi-directionally relative to the

- load-movement”, Available online 4 March 2002, Wear 252 (2002) 787 – 798, 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved
- Yukio Fujii, Kikuo Maeda “Flaking failure in rolling contact fatigue caused by indentation on mating surface (II), Formation process of flaking failure accompanied by cracks extending bi-directionally relative to the load-movement”, Available online 4 March 2002, Wear 252 (2002) 799 – 810, 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved.
  - Yukio Fujii, Kikuo Maeda “Flaking failure in rolling contact fatigue caused by indentation on mating surface (III), Mechanism of crack growth in the direction opposite to the load-movement”, Available online 4 March 2002, Wear 252 (2002) 811 – 823, 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved.
  - A. Torrance, J. E. Morgan, B. T. Y. Wan, “An additive’s influence on the pitting and wear of ball bearing steel”, Available online 26 July 1995, Wear 192 (1996) 66 – 73 , 1996 Elsevier Science S.A. All rights reserved.
  - Widner, Wolfe, “Analysis of Tapered Roller Bearing Damage”, American Society for Metals, Report C - 7 11.1, October 1997.
  - Murakami Y., Kaneta M., Yatsuzuka H., “Analysis of surface crack propagation in lubricated rolling contact”, ASLE Trans 1982.

#### Libri

- Gruppo SKF, “Manuale Tecnico”, quaderni di formazione, 1995.
- Gruppo SKF, “Elementi di meccanica delle trasmissioni, calcolo degli sforzi sul supporto”, quaderni di formazione, 1995.
- Gruppo SKF, “I cuscinetti volventi”, quaderni di formazione, Aprile 2008.
- Kalpakjian Serope, Schmid Steven R, “Tecnologia meccanica”, Addison Wesley Longman Italia, XVIII – 846, 2008.

- Emilio Massa, “Costruzioni di Macchine volume secondo”, edizione Masson 1997.
- Giovanni Mimmi, Paolo Pennacchi, “Appunti di Meccanica Applicata alle Macchine” dalle lezioni del Prof. Mimmi, edizione Cusl.
- Robert C.Juvinall, Kurt M. Marshek, “Fondamenti della progettazione dei componenti delle macchine” edizione ETS Pisa 1993.



## Webgrafia

- Wear in Rolling Element Bearings and Gears – How Age and Contamination Affect Them <http://www.machinerylubrication.com>
- Failure Analysis for Plain Bearings  
:<http://www.machinerylubrication.com>
- Tribology International : <http://www.elsevier.com/locate/triboind>
- Installation & Maintenance – Failure Analysis :  
<http://www.rexnord.com>
- Tapered Roller Bearing Damage Analysis : <http://www.timken.com>
- Wilcoxon Research : <http://www.wilcoxon.com>
- Failure modes in Rolling Bearings : <http://www.brighthub.com>
- Analisi dei cedimenti dei cuscinetti : <http://www.skf.com>
- Ball Bearings On-Line : <http://www.who-sells-it.com>
- NTN Bearing Failures and Solutions : <http://www.ntn.co.jp>

## RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare:

- il professore Marco Boniardi e la Dott.essa Ing. Silvia Barella per avere seguito con interesse e disponibilità, e per essere stati una guida importante per tutto il lavoro che è stato svolto;
- i mie Genitori e la mia Nonna per avermi sostenuto per tutti questi cinque lunghi anni;
- la mia fidanzata Annalisa per aver contribuito, alla correzione, alla impaginazione ed al layout;
- un ringraziamento particolare va a Parenti ed Amici per avermi supportato e sopportato per tutti questi cinque lunghi anni.