

COMPORTAMENTO A FATICA DI UN COMPOSTO POLIMERICO MISURATO SU UN NUOVO BANCO PROVA PER INGRANAGGI IN PLASTICA

**Riccardo Longato**, Longato Riccardo srls  
**Christine Hamon** e **Stefano Montani**, Solvay Specialty Polymers Italy S.p.A

## COMPORTAMENTO A FATICA DI UN COMPOSTO POLIMERICO PER INGRANAGGI

L'obiettivo di questo studio è stato quello di convalidare una metodologia per valutare le prestazioni di un composto polimerico per l'applicazione sugli ingranaggi, ponendo particolare attenzione alla caratterizzazione del comportamento all'usura del composto polimerico durante il test degli ingranaggi stessi. Questo articolo descrive come è stata determinata la valutazione dell'usura degli ingranaggi in materiale Ixef® PARA e dimostra come il banco di prova sia necessario per caratterizzare gli ingranaggi in materiale polimerico. Si presenta, inoltre, un caso applicativo presso Solvay per un test specifico e si illustra l'attività di test condotta per validare il prodotto.

### Introduzione

L'adozione di materiali plastici in varie applicazioni ingegneristiche sta aumentando sempre di più [1].

In particolare, sta aumentando l'uso di ingranaggi in plastica. Questi ingranaggi vengono utilizzati in nuove applicazioni, soprattutto nel settore automobilistico, dove vengono scelti per le loro importanti proprietà:

- ridotta massa e inerzia;
- assenza di lubrificazione;
- resistenza alla corrosione;
- smorzamento sonoro e delle vibrazioni (NVH);
- ridotto costo per produzione in serie;
- ridotto tempo di produzione;
- flessibilità nella realizzazione di

componenti semplici, forme complesse e integrate;

- riduzione di scarti di lavorazione e di produzione di CO<sub>2</sub>.

Dobbiamo anche ricordare che questi tipi di ingranaggi possono avere alcuni svantaggi, se paragonati agli ingranaggi in acciaio:

- proprietà meccaniche inferiori;
- proprietà termiche inferiori;
- basse tolleranze di lavorazione;
- limitate temperature operazionali;
- alta igroscopicità.

Ogni anno vengono prodotti nuovi tipi di materiali e compound, inoltre, vengono aggiunti alla miscela nuovi additivi come il PTFE per l'autolubrificazione, fibre di vetro e di carbonio per migliorarne le prestazioni meccaniche [2]. Il problema generale è che manca la conoscenza del comportamento di questi materiali in termini di rottura della radice del dente e di usura; il che rende difficile selezionare il tipo di materiale corretto per soddisfare diversi requisiti allo stesso tempo: ad esempio il vincolo a una determinata temperatura, la differenza tra funzionamento a secco ed ingranamento con lubrificante, le prestazioni di plastica su plastica o plastica su acciaio. Questo case study è un esempio interessante di come un'azienda produttrice di materie plastiche (Solvay) crei una nuova miscela per ingranaggi da testare nelle condizioni richieste dal cliente finale (coppia, velocità, temperatura) e con lubrificazione a grasso.

Lo specifico caso di prova descritto in

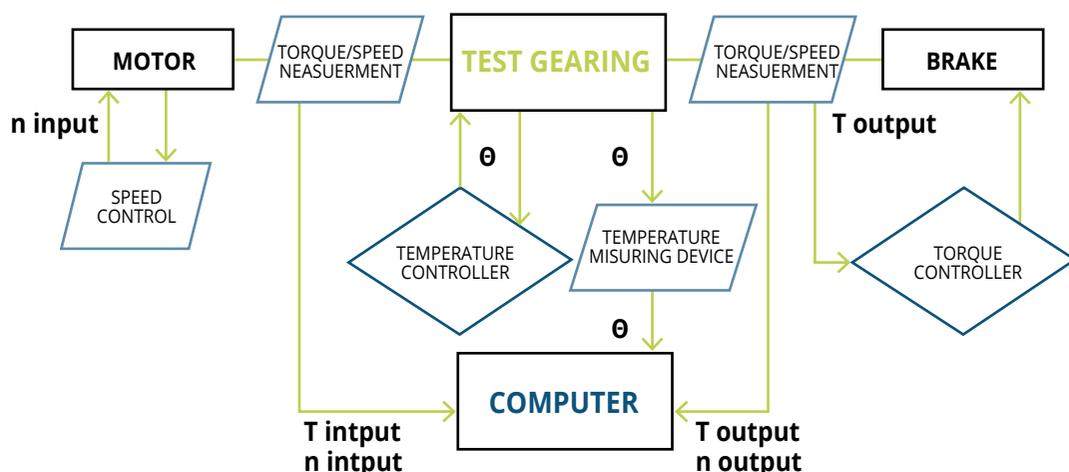


Figura 1. Layout del banco prova

questo articolo può essere generalizzato mostrando che il banco prova costruito da Longato Srls è certamente necessario non solo per eseguire prove specifiche richieste dal cliente, ma anche, in generale, per caratterizzare il nuovo materiale attraverso la realizzazione di curve di fatica, la determinazione di coefficienti di usura per descrivere i principali fenomeni studiati.

In sintesi, il presente documento intende raggiungere i seguenti obiettivi:

- sviluppare e validare un nuovo banco di prova per la caratterizzazione di ingranaggi ad alta temperatura in ambiente lubrificato;
- generare dati sull'usura degli ingranaggi su un nuovo materiale per il quale non sono disponibili dati in letteratura;
- dimostrare la gamma di utilizzo e l'applicabilità del materiale testato integrando test di resistenza chimica e analisi post-mortem.

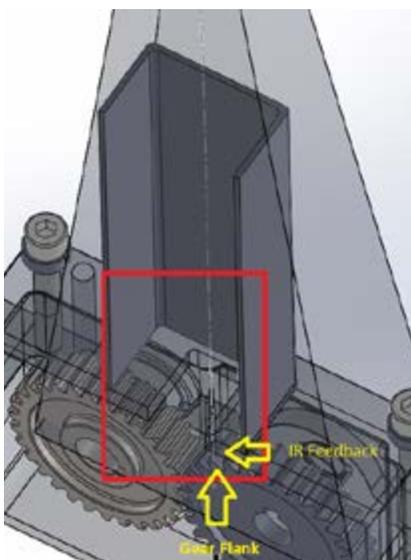
### Descrizione del banco prova

Il banco prova è del tipo ad anello aperto ed è stato disegnato usando il layout proposti dalla normativa VDI 2736-4 [3], (figura1). Il motore di azionamento dell'ingranaggio motore ( in acciaio) è controllato da un encoder per monitorare la velocità di rotazione e da un torsionometro per monitorare la coppia in ingresso.

La stessa strumentazione di controllo è applicata al motore sul quale è montato l'ingranaggio condotto (materiale plastico soggetto al test), tale motore agisce come freno con ricircolo di potenza elettrici allo scopo di minimizzare il consumo elettrico durante la fase di test. Controlli precisi sui segnali di rotazione degli ingranaggi e sul valore di coppia permettono al banco prova di fermarsi quasi istantaneamente al momento della rottura a base dente dell'ingranaggio condotto.

Gli ingranaggi sono inseriti in una cella climatica per poter realizzare test a temperature definite e controllate (figura 2). La temperatura dell'ingranaggio in plastica viene controllata in due differenti modi:

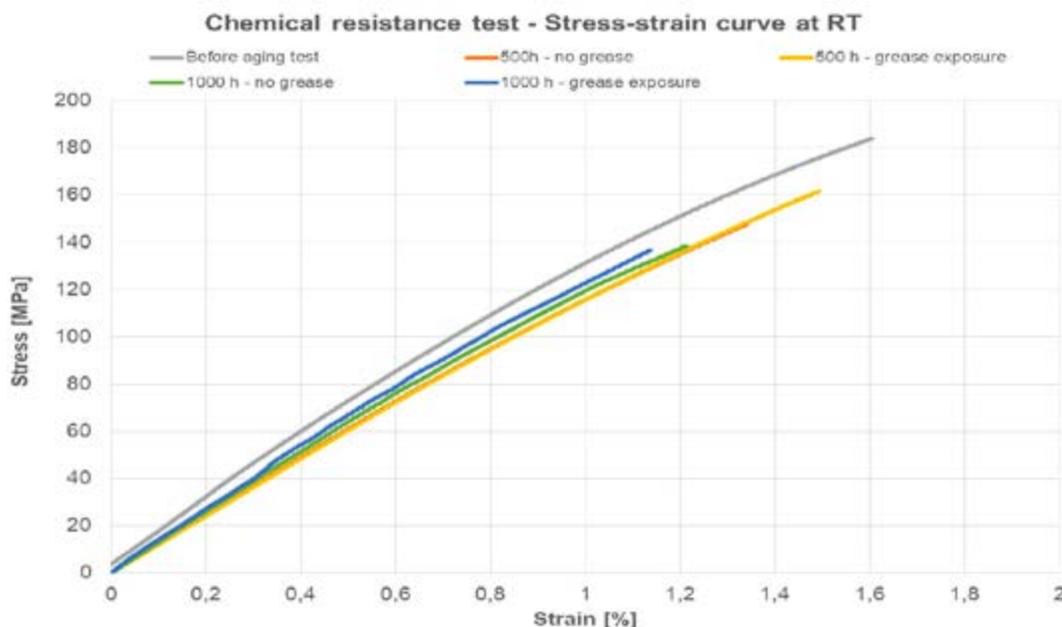
- il primo è quello di mantenere una temperatura costante all'interno della cella climatica;
- il secondo controllo può essere fatto monitorando la temperatura del fianco de della superficie del dente.



**Figura 3.** Sonda PT 100 inserita per misurare la temperatura del grasso



**Figura 2.** Misura della temperatura fianco del dente attraverso camera IR



**Figura 4.** Test di resistenza chimica

	Range	Catalogue data		Scale		Theoretical resolution	
Center distance	20 ÷ 150 mm			200	mm	0.01°C	mm
Position/speed	500 ÷ 4000 rpm	20	bit/rev	360	°	0.000343323	°
Torque	0 ÷ 10 Nm	24	bit	50	Nm	2.98E-06	Nm
Thermocouple PT100	-15°C+150°C	16	bit		°C	0,01	°C
Thermographic camera	-15°C+150°C	16	bit			Depending on the range of measure	

**TABELLA 1 - DATA SHEET DEL BANCO PROVA**

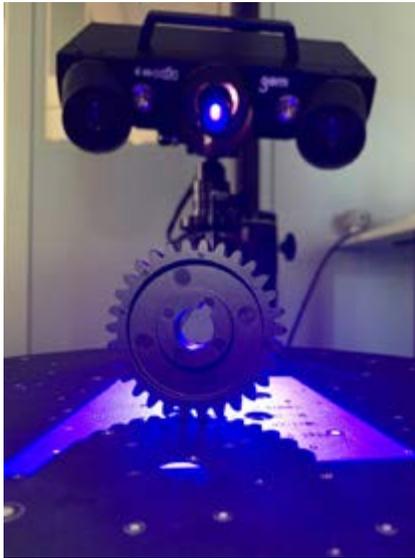


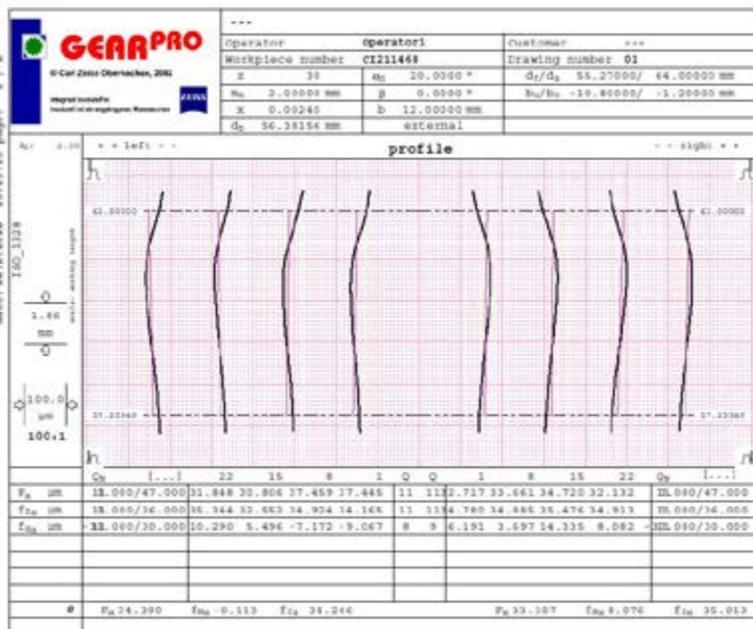
Figura 5. 3D scanner ottico



Figura 6. Peso dell'ingranaggio



Figura 7. Evolventmetro Zeiss



Properties	Typical values	Test method
Tensile modulus	11500 MPa	ISO 527-2/1A
Tensile stress (rottura)	190 MPa	ISO 527-2/1A
Tensile strain (rottura)	2%	ISO 527-2/1A
Flexural modulus	11500 MPa	ISO 178
Flexural stress	285 MPa	ISO 178
Deflection temperature under load 1.8 MPa, unannealed	230°C	ISO 75-2/A
Water adsorption (24h, 23°C)	0.2%	ISO 62

TABELLA 2 - PROPRIETÀ IXEF@PARA

Figura 8. Report della misura

Il test descritto in questo articolo è stato eseguito monitorando la temperatura del fianco del dente.

La cella climatica è mantenuta a temperatura costante attraverso il feedback del segnale inviato dalla termocamera IR Optris o dalla retroazione del segnale inviato dalla sonda PT100 che è inserita all'interno della cella climatica stessa (figura 3).

Nella tabella 1 vengono elencate le caratteristiche salienti del banco prova.

### Descrizione del prodotto Solvay

Solvay dispone di un ampio portafoglio di polimeri ad alte prestazioni adatti alle applicazioni sugli ingranaggi. I compound ultrapolimerici di Torton® PAI e Ketaspire® PEEK possono soddisfare requisiti molto esigenti grazie alle loro eccellenti proprietà termiche, meccaniche e F&W. L'uso dei composti polimerici semicristallini di Amodel® PPA, Ixef® PARA, Rytan® PPS è consigliato per applicazioni di ingranaggi meno

impegnative e più economiche. Questi materiali presentano proprietà chimiche, termiche e meccaniche superiori e un basso assorbimento di acqua rispetto ai più diffusi POM o PA46.

### Case study

In questo paragrafo si presenta l'analisi del comportamento tribologico di un ingranaggio Ixef® PARA. Questo materiale è un composto di poliarilammide rinforzato al 30% con fibra di vetro, che presenta un'elevata resistenza e rigidità, un'eccellente finitura superficiale e un'ottima resistenza al creep.

Il test di resistenza chimica eseguito su IXEF® PARA lubrificato con grasso Multemp SC-U a 140°C mostra l'eccellente stabilità del polimero alla temperatura e in presenza del lubrificante (figura 4). Le proprietà meccaniche di IXEF® PARA misurate a RT sono simili quando l'invecchiamento a 140°C viene

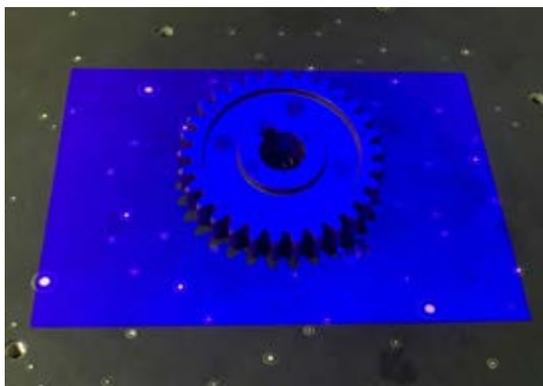


Figura 9. Scansione ottica



Figura 10. Risultato della scansione ottica (.step file)

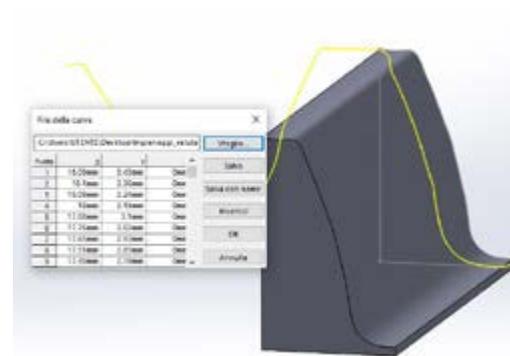


Figura 11. Forma del dente realizzata con SolidWorks

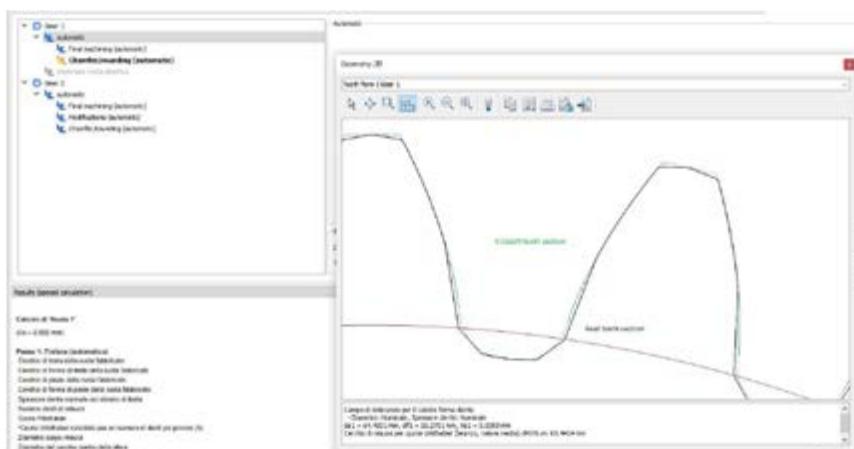


Figura 12. Forma del dente realizzata con KISSsoft

eseguito con o senza contatto con il grasso. La stabilità chimica del composto polimerico in presenza del grasso lubrificante in temperatura è importante per garantire il mantenimento di elevate proprietà meccaniche e di fatica per tutta la durata di vita dell'ingranaggio. La degradazione chimica può portare a guasti precoci.

La prova degli ingranaggi viene eseguita in una cella climatica a una temperatura di 100°C, con una coppia in ingresso di 10 Nm ed una velocità di rotazione di 1000 giri/min. L'intero sistema è lubrificato dal grasso MULTEMP SC-U di Kyodo Yushi Co, Ltd.

Nel test si utilizza un ingranaggio in acciaio come ingranaggio motore e l'ingranaggio Ixef® PARA (Mn=2) come ingranaggio condotto. Il rapporto di trasmissione è 1:1. Il test viene eseguito su ingranaggi con le stesse caratteristiche geometriche (modulo normale, numero di denti, ecc.). Per ottenere uno dei dati analizzabili da punto di vista statistico, si

eleggono due prove nelle stesse condizioni [coppia, velocità, temperatura].

#### Misura dell'usura

Controlliamo il comportamento dell'usura che si crea sul fianco del dente in due modi diversi: confrontando l'usura misurata dallo scanner ottico 3D (figura 5) e dalla pesatura dei componenti (figura 6). Inoltre, ogni 3x10<sup>6</sup> (3 milioni) di cicli, interrompiamo il test, effettuiamo un controllo visivo e una misurazione Wildhaber dei denti a bordo della macchina, quindi riavviamo il test. Gli ingranaggi vengono montati nuovamente sul banco di prova con lo stesso dente in contatto come prima.

#### Misura di base degli ingranaggi

Per verificare la geometria degli ingranaggi in plastica, analizziamo gli ingranaggi così come sono stati prodotti utilizzando due metodologie. In questo documento utilizziamo questi simboli secondo la norma ISO/TR 10064 [4].

#### Macchina a contatto

utilizzando una macchina Zeiss 3D PRISMO 7 con tavola rotante e software Gear, analizziamo i parametri di dentatura, l'analisi geometrica del fianco, il profilo e il passo (figura 7). Utilizziamo il grado di precisione secondo la norma ISO/DIS 1328-1 [5]. Questa norma stabilisce un sistema di classificazione delle tolleranze per la produzione e la valutazione della conformità dei fianchi dei denti delle singole ruote dentate cilindriche a evolvente. Questo è un estratto del rapporto Zeiss che indica la qualità dell'ingranaggio 11 perché gli ingranaggi sono stampati con uno stampo prototipo (figura 8).

#### Macchina senza contatto

Con una macchina di scansione ottica ATOS Q, acquisiamo la superficie 3D dell'ingranaggio in formato ".stl" per il successivo confronto con il modello matematico CAD 3D in formato ".step" mediante una mappa cromatica delle deviazioni e la successiva digitalizzazione della prima superficie di riferimento 3D corrispondente al nuovo ingranaggio (figura 9 e 10).

Costruiamo un modello per il calcolo dell'ingranaggio reale seguendo i seguenti passaggi:

- 1) Acquisizione della geometria dell'ingranaggio prima del test (superficie dei denti senza effetto di usura). L'output della scansione è un file in formato ".stl" dell'intera superficie degli ingranaggi. Con il software cad SolidWorks importiamo il file ".stl" e lo gestiamo per disegnare la sezione di un singolo ingranaggio in un file ".dxf" (figura 11).
- 2) Utilizzando il software KISSsoft inseriamo i dati della macro geometria ottenuti con il report standard della

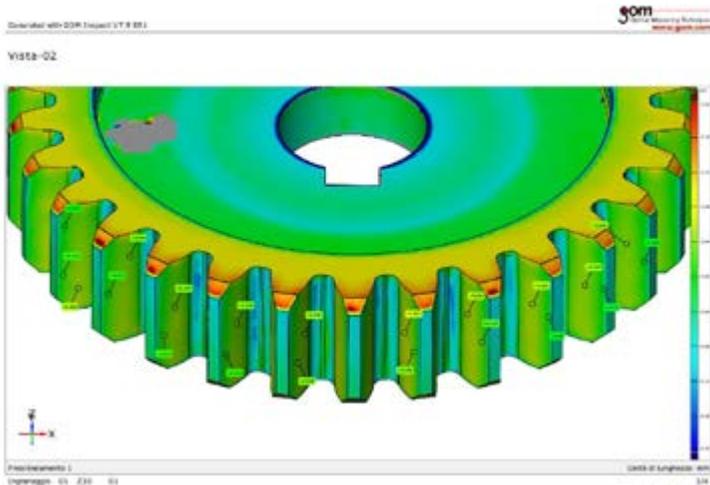


Figura 13. Mappa cromatica 3D

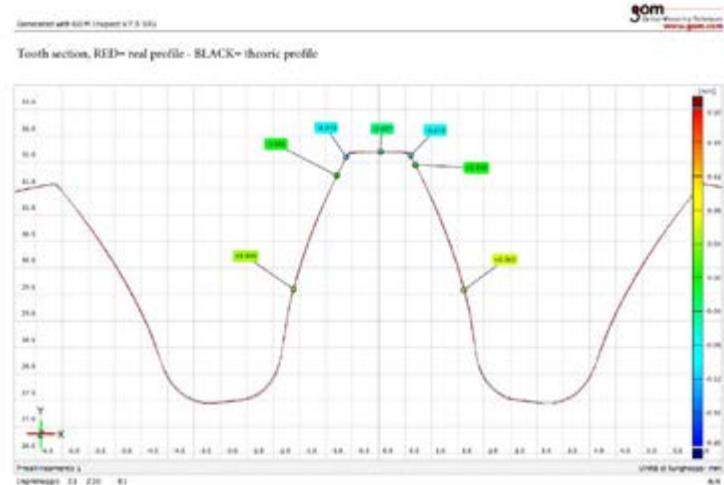


Figura 14. Sezione in 2D della mappa cromatica

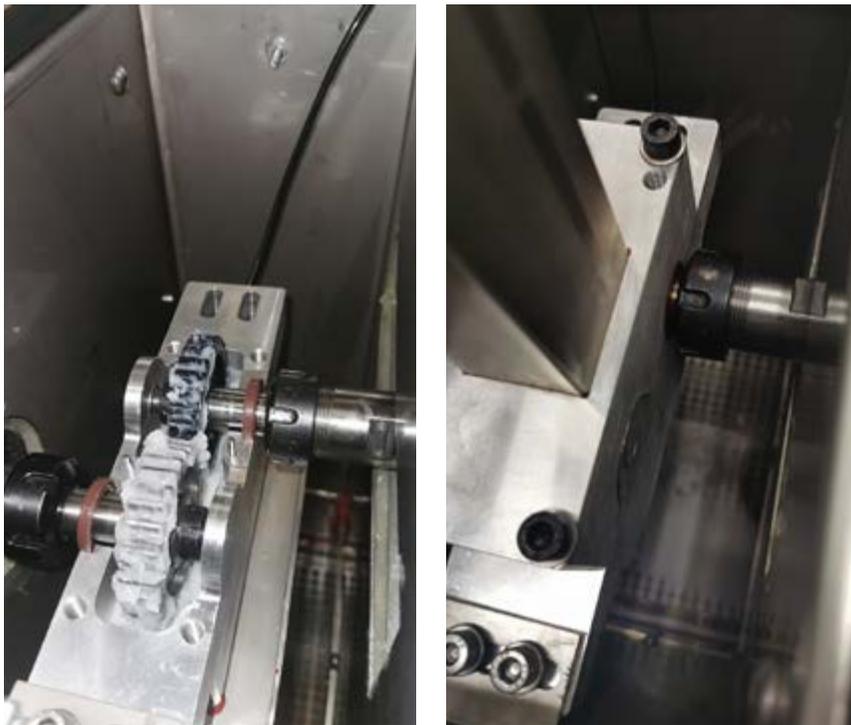


Figura 15. Setup del banco prova

Symbol	Designation	Unit
$W_{ks}$	Base tangent length steel gear	mm
$W_{kp}$	Base tangent length plastic gear	mm
$z$	Number of teeth	-
$x$	Profile shift coefficient	-
$a_w$	Center distance of a cylindrical gear pair	mm
$b$	Facewidth	mm
$B_w$	Common face width	mm
$d$	Reference diameter	mm
$F_\alpha$	Total profile deviation	$\mu\text{m}$
$F_\beta$	Total helix deviation	$\mu\text{m}$
$F_r$	Concentricity deviation	mm
$H_v$	Degree of tooth loss	-
$k_w$	Wear coefficient	$10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$
$l_{Fl}$	Profile line length of the active tooth flank	mm
$N_L$	Number of load cycles	-
$T_d$	Nominal torque	$\text{N}\cdot\text{m}$

TABELLA 3 - SIMBOLI GEOMETRIA DELL'INGRANAGGIO

una macchina di controllo (ZEISS). Importiamo la sezione “dxf” di un singolo dente in KissSoft per creare un ingranaggio “ideale” fatto dalla “sezione dei denti reali”. Come azione finale esportiamo l’“ingranaggio reale” in formato “.step”, (figura 12).  
 3) Confrontiamo con il software “GOM Inspect” l’immagine 3D “reale” dell’ingranaggio con il modello 3D “ideale” del medesimo per ottenere il miglior adattamento.

Questa è una mappa cromatica della sovrapposizione della scansione ottica 3D e del modello 3D KISSsoft costruito con la scheda “forma del dente”. Infine, abbiamo il modello 3D con la “best fit geometry” da utilizzare per l’analisi FEM. I profili “reali” degli ingranaggi differiscono al massimo di 0,05-0,06 mm rispetto all’ingranaggio “ideale” calcolato. Sarebbe interessante utilizzare la stessa procedura per valutare il profilo dei denti degli ingranaggi in acciaio, ma questo

non è l’oggetto di questa ricerca. Questi profili reali saranno confrontati durante il test per analizzare l’avanzamento dell’usura (figure 13 e 14).

4) Pesatura dei componenti, con risoluzione 0,01 mg L’ingranaggio è stato soffiato con aria compressa e poi condizionato in un forno a 40°C per 30 minuti, infine stabilizzato in un essiccatore per 15 minuti e pesato. La tabella 4 mostra il peso medio dei due ingranaggi prima del test (0 cicli).

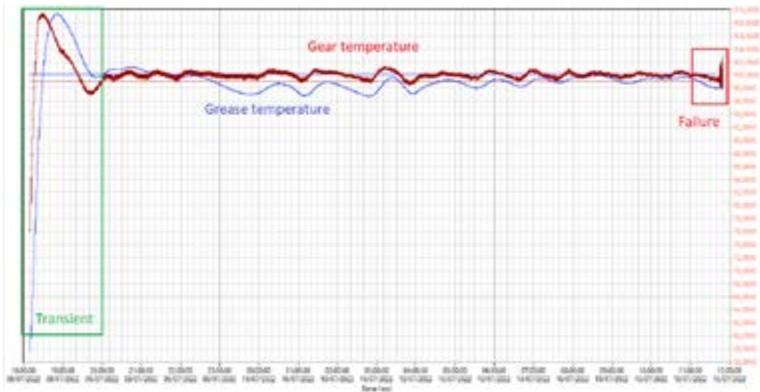


Figura 16. Grafico delle temperature

Componente	Ingranaggio #1 prima del test	Componente	Ingranaggio #1 prima del test
Prima pesata (g)	31.46409	Prima pesata (g)	31.47275
Seconda pesata (g)	31.46400	Seconda pesata (g)	31.47273
Terza pesata (g)	31.46410	Terza pesata (g)	31.47272
<b>Media (g)</b>	<b>31.46406</b>	<b>Media (g)</b>	<b>31.47273</b>

TABELLA 4 - PESO DEGLI INGRANAGGI PRIMA DEL TEST

	Cicli	Guasto	Temperatura ingranaggio °C	Deviazione standard Std. Dev.
Ingranaggio#1	10.059.222	Rottura della radice del dente	100.33	1.51
Ingranaggio#2	9.272.959	Rottura della radice del dente	100.32	1.31
	Temperatura grasso °C	Deviazione standard Std. Dev.	Coppia Nm	Deviazione standard Std. Dev.
Ingranaggio#1	99.29	2.95	10	0.03
Ingranaggio#2	99.14	2.78	10	0.03

(Nota per la tabella: "Std. Dev" è la "deviazione standard" della misura della temperatura dell'ingranaggio. Durante il test, i dati della temperatura vengono raccolti dalla telecamera IR ogni 27 Hz. Vengono infine calcolate la media e la deviazione standard dei dati raccolti)

TABELLA 5 - RISULTATI DEL TEST

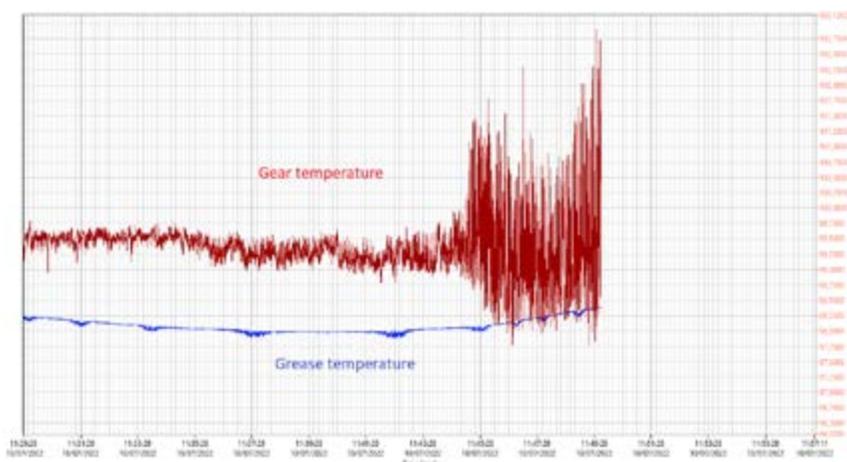


Figura 17. Temperature alla rottura

La formula della media è:

$$Average [g] = \sum_{n=1}^3 g_n / n$$

dove:

Average [g]: media della pesata dell'ingranaggio

$g_n$  : è il peso della pesata-n

### Acquisizione dei dati

Il test eseguito è un test di lunga durata, si vuole verificare il comportamento dell'ingranaggio fino alla sua rottura. Per eseguirlo, utilizziamo un ingranaggio in acciaio come ingranaggio motore e un ingranaggio in plastica come ingranaggio condotto in condizioni di lubrificazione a grasso [6].

Le condizioni di input utilizzate per i test sono le seguenti:

- Coppia ingresso: 10 Nm
- Velocità ingresso: 1000 rpm
- Temperatura fianco del dente ingranaggio in plastica: 100°C

I dati che si desidera acquisire sono i seguenti:

- Temperatura grasso [°C]
- Numero di cicli [-]
- Misura Wildhaber degli ingranaggi ogni 3x106 milioni di cicli [mm]
- Scansione ottica 3D e pesatura ingranaggi [gr]

Eseguiamo il test su due ingranaggi ( GEAR#1 and GEAR#2) per avere un punto di vista statistico.

### Setup del banco prova

Per eseguire il test, abbiamo costruito un alloggiamento in alluminio. In questo alloggiamento abbiamo inserito gli ingranaggi e poi l'intero sistema è stato collocato all'interno di una camera climatica.

Nella scatola di alluminio abbiamo installato una sonda PT100 per misurare la temperatura del grasso durante il test. Per mantenere costante la temperatura sulla superficie dell'ingranaggio abbiamo utilizzato una termocamera IR con un segnale di feedback. Questo segnale viene inviato al software di controllo termico che manterrà costante il valore di temperatura sulla superficie del dente di 100°C, riscaldando o raffreddando l'atmosfera all'interno della camera climatica in un ciclo chiuso.

I motori elettrici sono dotati di encoder per il monitoraggio della velocità e due torsimetri sono installati sugli alberi di

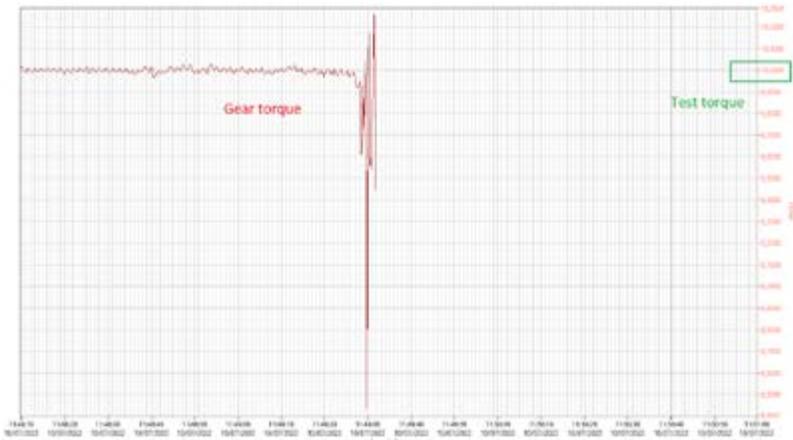


Figura 18. Grafico della coppia alla rottura

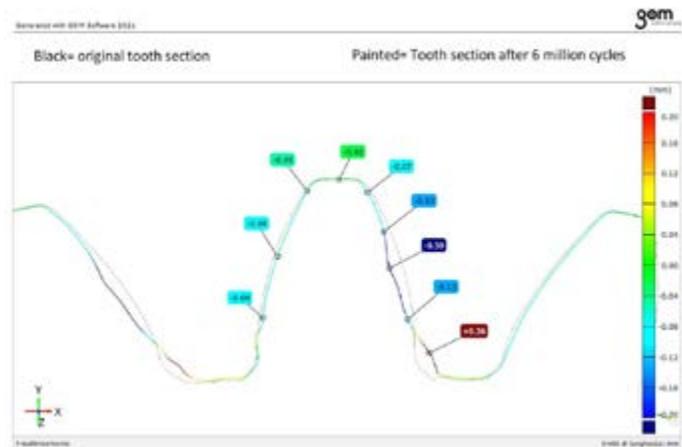


Figura 19. Comportamento dell'usura GEAR#1



Figura 20. Comportamento dell'usura del GEAR#1 al termine del test

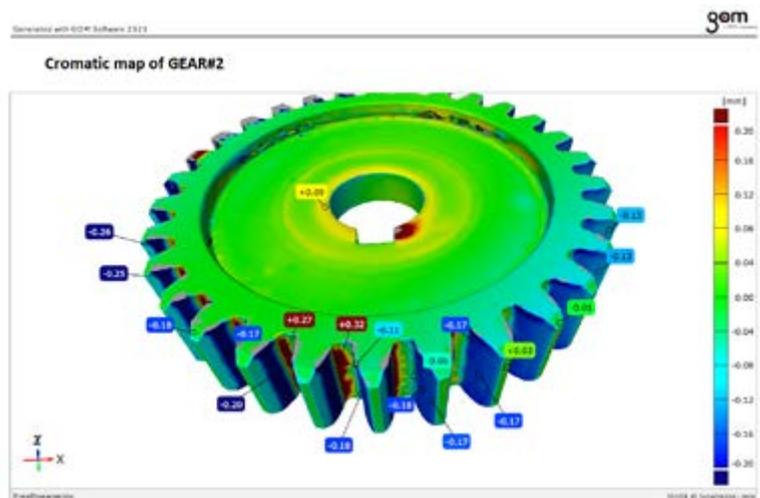


Figura 21. Mappa cromatica ingranaggio GEAR#2

ingresso e di uscita. Il test inizia con la fase di riscaldamento, in cui gli ingranaggi ruotano a 60 giri/minuto con una coppia di 0,5Nm. Una volta raggiunta la temperatura dei denti di 80°C, inizia la fase di prova in cui gli ingranaggi accelerano fino a 1000 giri/minuto alla coppia di 10 Nm con una rampa di accelerazione definita dall'autore. In questo modo, non si stressano termicamente gli ingranaggi e non si introducono fattori meccanici che potrebbero compromettere la prova. Un sistema sensibile di misurazione della coppia e della velocità degli ingranaggi interrompe la prova quando si verifica il guasto (figura 15).

### Risultati della post elaborazione del test

Nella tabella 5 sono riportati i cicli di

guasto degli ingranaggi: il guasto è stato la rottura della radice del dente. La figura 16 mostra le temperature del grasso e dell'ingranaggio. Si osserva la fase di transizione in cui la temperatura sale fino a 110°C e poi le temperature raggiungono l'equilibrio termico in 2 ore. Durante la fase di test, la temperatura del grasso segue il comportamento termico della temperatura dell'ingranaggio. Alla fine del test, la temperatura media del grasso era di 99°C e la temperatura media dell'ingranaggio di 100°C, a dimostrazione della buona qualità del grasso. La figura 17 mostra il comportamento delle temperature quando si verifica il guasto.

Abbiamo inoltre controllato l'ingranaggio 1 e l'ingranaggio 2 ogni 3x10<sup>6</sup> (3 milioni) di cicli. Durante questa fase

effettuiamo un controllo visivo e una misurazione Wildhaber del dente sul banco di prova. Gli ingranaggi vengono montati nuovamente sul banco di prova con lo stesso dente in contatto come prima. Ogni 3x10<sup>6</sup> cicli abbiamo misurato gli stessi denti 3 volte e calcolato la misura media di Wildhaber (tabella 6). Se rappresentiamo graficamente la differenza tra la misura Wildhaber del test e la misura Wildhaber del test precedente (GEAR#1 e GEAR#2) in funzione dei cicli di carico, otteniamo una linea retta con una correlazione lineare di circa R<sup>2</sup>=0,99. Il grafico in tabella 7 mostra una relazione lineare del tasso di usura con il numero di cicli.

Abbiamo inoltre misurato il peso degli ingranaggi, dopo un lavaggio accurato per rimuovere ogni contaminazione. La



Figura 22. Analisi ottica

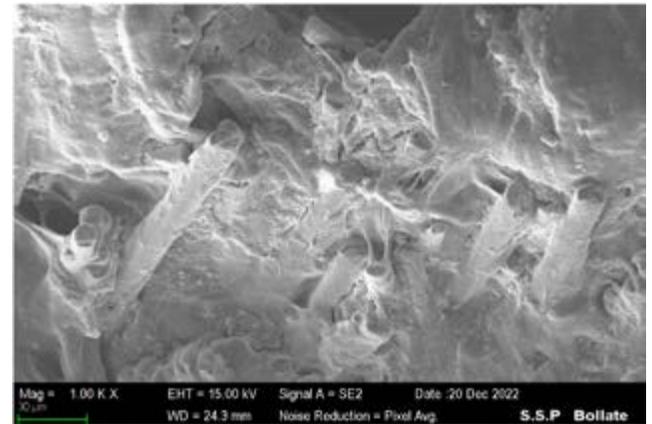


Figura 23. Analisi SEM

N° ingranaggio	Prima del test				3 milioni di cicli				6 milioni di cicli			
	1	2	3	Media	1	2	3	Media	1	2	3	Media
	W su z = 5 denti (mm)				W su z = 5 denti (mm)				W su z = 5 denti (mm)			
1	27.37	27.36	27.35	27.36	27.259	27.259	27.258	27.26	27.156	27.158	27.157	27.16
2	27.35	27.35	27.32	27.34	27.28	27.18	27.18	27.21	27	27.3	27.1	27.13
N° ingranaggio	3 milioni di cicli				10 milioni di cicli							
	1	2	3	Media	1	2	3	Media				
	W su z = 5 denti (mm)				W su z = 5 denti (mm)							
1	27.03	27.08	27.1	27.07	27.07	27.08	27.07	27.07				
2	27.05	27.04	27.04	27.04	-	-	-	-				

TABELLA 6 - MISURE WILDHABER



perdita di peso è dovuta al processo di usura che rimuove il materiale plastico dell'ingranaggio. Il GEAR#1 si è ridotto in peso di 1.25861 gr, the GEAR# 2 si è ridotto di 1.33560 gr. Dalla formula (19) della norma VDI 2736 parte 2, cerchiamo di stimare il coefficiente di usura dalla geometria della dentatura e dal grado di perdita di peso dell'ingranaggio.

$$k_w = \frac{W_m \cdot b_w \cdot z \cdot l_{Fl}}{T_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_L \cdot H_v} \quad (2)$$

dove:

- $W^m$  è l'usura lineare media
- $b_w$  è la fascia comune degli ingranaggi
- $z$  è il numero di denti
- $l_{Fl}$  è la lunghezza della linea del profilo del fianco del dente attivo

$T_d$  è la coppia nominale

$N_L$  è il numero di cicli

$H_v$  è il grado di perdita del dente

Otteniamo  $k_w = 4.81 [10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{Nm})]$

$\pm 0.12$ , questo è un valore indicativo del coefficiente di usura perché è stato molto difficile verificare la misura Wildhaber sull'ingranaggio affetto da usura.

Con una macchina a scansione ottica, abbiamo acquisito superficie 3D del GEAR#1 a 6x10<sup>6</sup> cicli e confrontato la geometria dell'ingranaggio con quella originale prima del test.

Sembra che il materiale venga trasportato dalla parte superiore (diametro di testa) dell'ingranaggio alla zona della radice del dente (figure 19 e 20). La figura 21 mostra un esempio di mappa cromatica acquisita.

L'analisi ottica post-mortem dell'ingra-

aggio IXEF® PARA mostra che ogni dente è consumato sul fianco di lavoro (figura 22). Tutti i denti presentano microfratture trasversali nella parte inferiore del fianco. Ciò indica che la deformazione era distribuita in modo omogeneo. L'analisi al SEM mostra che le fibre di vetro nell'ingranaggio usurato mantengono uno strato residuo di polimero sulla loro superficie, indicando una buona adesione residua tra le fibre di vetro e la matrice polimerica (figura 23).

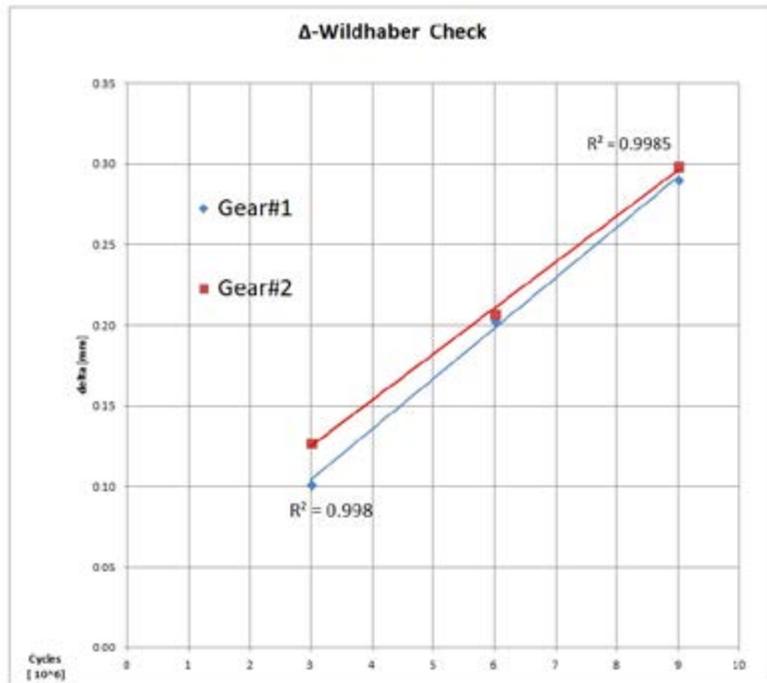


TABELLA 7 - GRAFICO DIFFERENZA DELLE MISURE WILDHABER

Componente	Ingranaggio #1 prima del test	Ingranaggio #1 dopo 6 milioni di cicli	Ingranaggio #1 rottura
Prima pesata (g)	31.46409	31.17290	30.20547
Seconda pesata (g)	31.46400	31.17281	30.20545
Terza pesata (g)	31.46410	31.17283	30.20544
<b>Media (g)</b>	<b>31.46406</b>	<b>31.17285</b>	<b>30.20545</b>
Componente	Ingranaggio #2 prima del test	Ingranaggio #2 rottura	
Prima pesata (g)	31.47275	30.13715	
Seconda pesata (g)	31.47273	30.13711	
Terza pesata (g)	31.47272	30.13714	
<b>Media (g)</b>	<b>31.47273</b>	<b>30.13713</b>	

TABELLA 8 - MISURAZIONI PESO DELL'INGRANAGGIO

Questo aspetto è fondamentale per evitare l'innesco e la propagazione precoce di cricche nel composto polimerico, che possono portare a guasti precoci nell'applicazione degli ingranaggi. Le buone proprietà del composto IXEF® PARA hanno permesso di raggiungere una lunga durata di 10 milioni di cicli.

### Conclusioni

La metodologia utilizzata per caratterizzare le prestazioni e il comportamento

all'usura di un composto polimerico ha dato risultati interessanti. Il coefficiente di usura del composto polimerico nel test sugli ingranaggi è stato determinato mediante misure di peso e di misura delle quote Wildhaber. Inoltre, le scansioni 3D combinate con l'analisi al microscopio ottico alla fine del test hanno fornito una buona indicazione del modo in cui i singoli denti si sono consumati e deformati durante il test.

La miscela IXEF® PARA ha mostrato

### Bibliografia

- [1] S. Karl, "Progettare gli ingranaggi del futuro," presented at the MecSpe 2018, Parma, Mar. 2018.
- [2] AGMA, AGMA 920-A01: Materials for Plastic Gears. 2001.
- [3] VDI 2736-4: "Thermoplastic gear wheels - Determination of strength parameters on gears", 2016.
- [4] ISO/TR 10064-1, "Code of inspection practice - Part 1: Measurements of cylindrical gear tooth flank", 2019-09.
- [5] ISO/DIS 1328-1, "Cylindrical gears - ISO system of flank tolerance classification - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flank of gear teeth", 2022.
- [6] R. Longato and M. Turci, "The effect of temperature on the SN curve for bending stress measured on a new test rig for plastic gears" presented at the International Conference on Gears 2021, Garching, 2021.

*Articolo tratto da una relazione presentata all'AGMA FTM 2023 e stampato con l'autorizzazione dell'American Gear Manufacturers Association, proprietaria dei diritti d'autore. American Gear Manufacturers Association, 1001 N. Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314. Le dichiarazioni e le opinioni espresse in questo testo sono quelle degli autori e non sono da considerarsi ufficiali dell'American Gear Manufacturers Association. Si ringrazia l'AGMA per la gentile autorizzazione alla pubblicazione (Ndr).*

buone prestazioni dell'ingranaggio a 100°C nelle condizioni di prova, raggiungendo i 10 milioni di cicli. In questo test, condotto in presenza di un grasso lubrificante, non è stata osservata alcuna usura importante sul fianco del dente. Infine, poiché l'impatto del grasso sulle prestazioni del materiale è trascurabile, abbiamo potuto correlare l'usura misurata al progressivo deterioramento per fatica dovuto alla rotazione dell'ingranaggio.

I test hanno confermato le prestazioni superiori di Ixef® PARA a contatto con il grasso ad alta temperatura. Questo risultato apre la strada a una nuova serie di applicazioni, per le quali i requisiti di temperatura diventano ogni giorno più impegnativi. ●

### Ringraziamenti

Un ringraziamento particolare a UNILAB Laboratori Industriali s.r.l. per il supporto fornito durante la fase di analisi degli ingranaggi.