

UNA PROCEDURA PER LA VALUTAZIONE DEI LIMITI DI UTILIZZO DI O-RING SOTTOPOSTI AD INTENSI FASCI DI NEUTRONI

D.Battini^a, F.Bignotti^{a,b}, G.Donzella^a, M.Ferrari^{a,b,c}, S.Pandini^{a,b}, A.Zenoni^{a,b,c},
D.Alloni^{d,c}, M.Prata^{d,c}, A.Salvini^{d,c}, A.Andrighetto^e, A.Monetti^e

^a *Università degli Studi di Brescia - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale,
Via Branze 38, 25123 Brescia, e-mail: giorgio.donzella@unibs.it*

^b *INSTM, Unità di Ricerca di Brescia, Università degli Studi di Brescia,
Via Branze 38, 25123 Brescia, e-mail: aldo.zenoni@unibs.it*

^c *INFN, Sezione di Pavia,
Via Bassi 6, 27100 Pavia, e-mail:matteo.ferrari@pv.infn.it*

^d *Laboratorio LENA, Università di Pavia,
Via G. Aselli 41, 27100 Pavia, e-mail:andrea.salvini@unipv.it*

^e *Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN,
Viale dell'Università 2, 35020 Legnaro (Padova), e-mail:alberto.andrighetto@lnl.infn.it*

Sommario

Si presenta una procedura per la previsione della durata di utilizzo di O-ring in materiale polimerico impiegati nei bersagli per la produzione di fasci di ioni radioattivi. Si sono dapprima condotte prove di tenuta a vuoto e analisi a elementi finiti di un O-ring di riferimento operante con diversi livelli di interferenza con la cava, identificando la precompressione limite per la tenuta e la corrispondente pressione di contatto con la cava. Si sono poi effettuate prove di trazione e di Compression Set su campioni di O-ring in EPDM, preventivamente sottoposti a diversi livelli di irraggiamento in campi misti di neutroni e gamma, analizzando l'effetto della dose assorbita sul comportamento meccanico del materiale e sulle corrispondenti proprietà resistenziali, e definendo opportune leggi costitutive. Si sono infine simulate le progressive modifiche di comportamento della guarnizione indotte dall'irraggiamento, prevedendone la durata in esercizio in termini di tenuta e di resistenza strutturale.

Abstract

A procedure for the working end points prediction of polymeric O-rings employed in the targets for the production of radioactive ion beams is here presented. Vacuum leakage tests and finite element analyses on a reference O-ring operating with varying interference with the groove were at first carried out; the minimum squeeze degree assuring O-ring sealing efficiency was thus determined, together with the correspondent contact pressure level between O-ring and groove. Tensile and Compression Set tests were then carried out on EPDM O-ring specimens, previously irradiated with mixed neutron and gamma fields for different durations; the effect of the absorbed dose on the mechanical behavior of the material and its strength properties were investigated in this way, and suitable constitutive laws were defined. The progressive change in the seal behavior due to radiation was finally simulated, predicting the O-ring working life in terms of sealing and structural resistance.

Parole chiave: O-ring, tenuta, irraggiamento da neutroni e gamma

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si sta assistendo allo sviluppo di acceleratori di particelle in grado di produrre intensi fasci di ioni radioattivi per studi di frontiera di fisica nucleare. Numerose sono le problematiche connesse a questo tipo di impianti, legate soprattutto all'elevata intensità delle radiazioni neutroniche e fotoniche generate, che, insieme alle elevate temperature, mettono a dura prova la resistenza dei componenti impiegati nella loro realizzazione. Uno degli elementi più delicati dell'intero sistema sono le guarnizioni a vuoto, di tipo O-ring, impiegate nella Camera del Bersaglio, il dispositivo che alloggia, in una camera a vuoto spinto, sia il bersaglio di ^{238}U destinato a fissionare sotto l'azione di un intenso e energetico fascio primario di protoni, sia la sorgente di ioni. A causa del degrado dovuto alla temperatura e all'irraggiamento, a scopo prudenziale la loro sostituzione è prevista ad una frequenza elevata, insieme ad intere parti di apparato che non possono essere smontate per ragioni di sicurezza. Ciò comporta corrispondentemente ingenti costi. Uno studio del danneggiamento da campi neutronici e fotonici e degli effettivi limiti di utilizzo di queste guarnizioni è perciò di forte interesse, sia dal punto di vista scientifico che da quello applicativo, potendo fornire informazioni importanti per la scelta e/o lo sviluppo dei materiali più idonei a queste applicazioni e per la definizione del ciclo di vita degli apparati.

In generale, la progettazione di un O-ring comporta innanzi tutto la scelta di un materiale adeguato all'applicazione, la successiva definizione del diametro della sezione nonché il dimensionamento della sede che lo alloggia, e in particolare la profondità della cava. Quest'ultimo parametro definisce il livello precompressione dell'O-ring [1], [2] che a sua volta determina la distribuzione e l'entità delle pressioni di contatto tra l'O-ring e la cava. La pressione massima di contatto tra O-ring e cava è in particolare la grandezza che definisce la tenuta del fluido [3], ma in letteratura esistono pochissimi dati sul suo valore minimo limite: di conseguenza, i valori di precompressione consigliati dai produttori degli O-ring appaiono ampiamente cautelativi in tal senso. Peraltro, la precompressione crea uno stato di sollecitazione interno all'O-ring, che se eccessivo può dare adito a cedimenti di tipo strutturale. Esiste perciò un margine di ottimizzazione che appare ampio e che nella specifica applicazione si può tradurre in un'estensione "sicura" della vita del componente.

Per raggiungere questo obiettivo occorre tener conto del progressivo degrado del materiale in esercizio. Gli elastomeri soffrono infatti di effetti ambientali che ne modificano la struttura, variandone di conseguenza anche il comportamento meccanico [4]. Il danneggiamento da irraggiamento di questi materiali è stato studiato in passato solo mediante radiazioni γ : in particolare, tra le indagini più significative, si ricordano quelle di Burnay et al. [5], che hanno analizzato il comportamento di O-ring in VITONTM mediante misure della forza di tenuta, prove di Compression Set e prove di leakage; i risultati di queste prove mostrano una significativa riduzione della forza di tenuta all'aumentare della dose di radiazioni assorbita e una sua stretta correlazione con i risultati delle prove di Compression Set. Placek et al. [6] hanno invece analizzato O-ring in EPDM, rilevando un aumento di fragilità del materiale con la dose e un contemporaneo aumento del Compression Set. Le Lay [7] ha studiato guarnizioni in EPDM preventivamente invecchiate ad alta temperatura e successivamente irraggiate con raggi γ , rilevando modifiche rilevanti solo per dosi elevate. Allo stato attuale, i risultati di indagini effettuate sulla resistenza alle radiazioni di O-ring da vuoto non sono tuttavia confluiti in una specifica procedura di progetto e di sostituzione degli O-ring per applicazioni nel campo della costruzione di acceleratori: in via cautelativa il periodo di esercizio ammissibile di questi componenti viene stabilito semplicemente pari a quello nel quale è prevista una variazione del 25% della proprietà meccanica (del materiale) più sensibile all'irraggiamento [8]. Resta inoltre pressoché sconosciuto il comportamento di queste guarnizioni in presenza di intensi campi di neutroni.

Nel presente lavoro ci si propone di contribuire a colmare questo gap, presentando una procedura atta a definire i limiti di utilizzo degli O-ring a vuoto sotto l'effetto di intensi campi di neutroni e gamma. A tale scopo vengono integrate metodologie sperimentali con metodologie numeriche, al fine di prevedere la vita in esercizio delle guarnizioni, sia dal punto di vista funzionale (tenuta), sia da quello strutturale (resistenza). La procedura è stata messa a punto su un O-ring di riferimento con dimensioni ridotte, particolarmente comode per le prove sperimentali effettuate; tuttavia essa è facilmente estendibile ai componenti montati sull'impianto.

2. SCHEMA DELLA RICERCA, CAMPIONI E MATERIALI

La procedura di previsione è stata sviluppata con una serie di attività, articolate nelle seguenti fasi:

- determinazione della condizioni limite di tenuta degli O-ring;
- determinazione delle caratteristiche meccaniche del materiale in funzione del livello di irraggiamento;
- previsione della durata in esercizio degli O-ring.

La fase a), di carattere sia sperimentale che numerico, è stata condotta su O-ring di dimensioni ridotte, scelte in modo che essi possano essere in futuro irraggiati all'interno di un canale di un reattore (diametro di sezione 2,62 mm, diametro interno dell'anello 13,94 mm), realizzati in NBR (Nitrile-Butadiene Rubber) e VITON™ (Fluoroelastomero). La fase b), di tipo sperimentale, è stata condotta su spezzoni di O-ring con diametro di sezione 5.33 mm e diametro interno dell'anello 227,97 mm, realizzati in EPDM (Etilene-propilene). La fase c), di tipo numerico, è stata condotta su O-ring di geometria uguale a quelli della fase a), realizzati nel materiale (EPDM) studiato nella fase b).

3. DETERMINAZIONE DELLA CONDIZIONI LIMITE DI TENUTA DEGLI O-RING

Questa fase ha comportato in primo luogo l'esecuzione delle prove di tenuta a vuoto su campioni di O-ring sottoposti a diversi livelli di precompressione. A tale scopo è stato realizzato un dispositivo atto a contenere gli O-ring durante le prove di tenuta, consistente sostanzialmente in un tubo con un fondo flangiato e bullonato (fig.1). La flangia di chiusura alloggia al suo interno un disco, nel quale è ricavata la cava dell'O-ring.

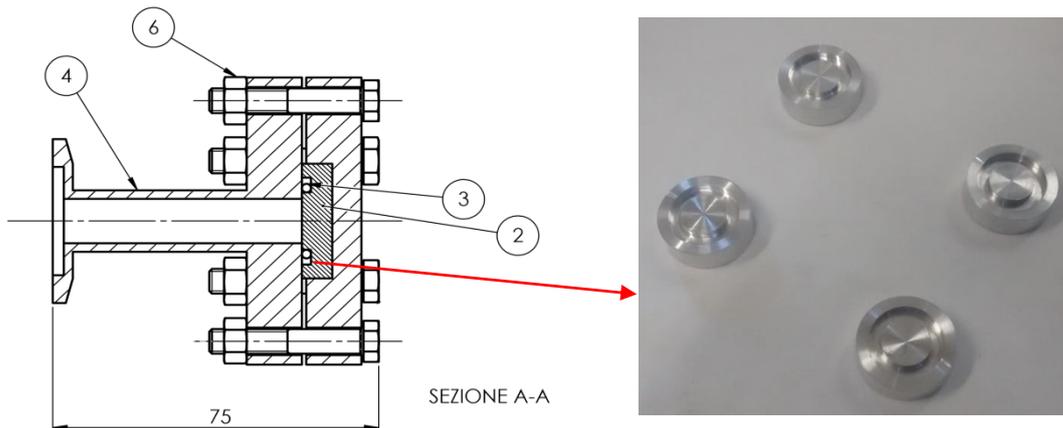


Figura 1. Dispositivo per le prove di tenuta, con particolare dei dischi porta O-ring

Sono stati realizzati diversi dischi con diverse profondità di cava, in modo da poter ottenere diversi livelli di precompressione dell'O-ring (o squeeze degree, definito come rapporto percentuale tra lo schiacciamento imposto all'O-ring e il suo diametro nominale, vedi fig.2), riportati in tab.I.

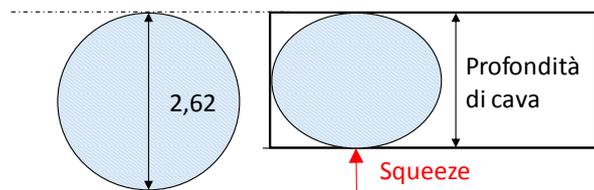


Figura 2. Schema di precompressione degli O-ring

Tabella 1. Profondità di cava e relativi livelli di precompressione degli O-ring

Profondità di cava [mm]	2,62	2,60	2,56	2,50	2,40	2,10
Squeeze degree [%]	0	0,76	2,3	4,6	8,4	19,8

I valori sono stati scelti in modo da spaziare dal massimo livello di precompressione (profondità di cava di 2.1 mm) consigliato per questo O-ring [3] ad una precompressione nulla, per poter essere certi di determinare sperimentalmente la condizione di perdita di tenuta. Il grado di rugosità della cava è di $0.4 \mu\text{m}$, valore in linea con quanto prescritto dai produttori degli O-ring [3].

In fig.3 è illustrato il dispositivo di prova montato sull'apparecchiatura ASM 142, utilizzata per le prove di tenuta. La misura viene effettuata realizzando il vuoto all'interno del tubo mediante una pompa, introducendo attraverso un'apposita fessura e un ugello dell'elio sull'esterno della cava e misurando la quantità di gas che penetra all'interno del tubo (perdita).

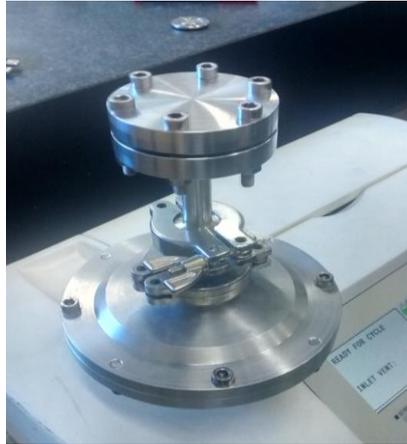


Figura 3. Dispositivo e apparecchiatura per le prove di tenuta a vuoto

Le misure sono state effettuate su 6 O-ring realizzati in NBR e 1 O-ring realizzato in VITONTM, per le diverse profondità di cava di tabella 1. I risultati sono riportati in fig. 4, dove la perdita è espressa in termini di portata molecolare dopo 4 minuti dall'immissione del gas (tempo dopo il quale il suo valore si manteneva pressoché costante). Occorre osservare che la tenuta di un O-ring non può mai essere perfetta, per effetto della permeabilità del materiale e della rugosità delle superfici di contatto tra O-ring e cava, attraverso cui si insinua una certa quantità di fluido [5], [9]. Si tratta perciò di definire un valore limite di perdita, di seguito definito "soglia di tenuta", che può essere considerato trascurabile e quindi accettabile. Per il presente studio, tale valore è stato assunto pari a 10^{-7} mbar·l/s, tipico per le valvole ad alto vuoto [10]. Dal grafico di fig.4 si osserva che gli O-ring (soprattutto quello in VITONTM) sono in grado di esercitare tenuta anche con una minima precompressione, risultato in linea con evidenze sperimentali osservate da altri ricercatori [5], [9].

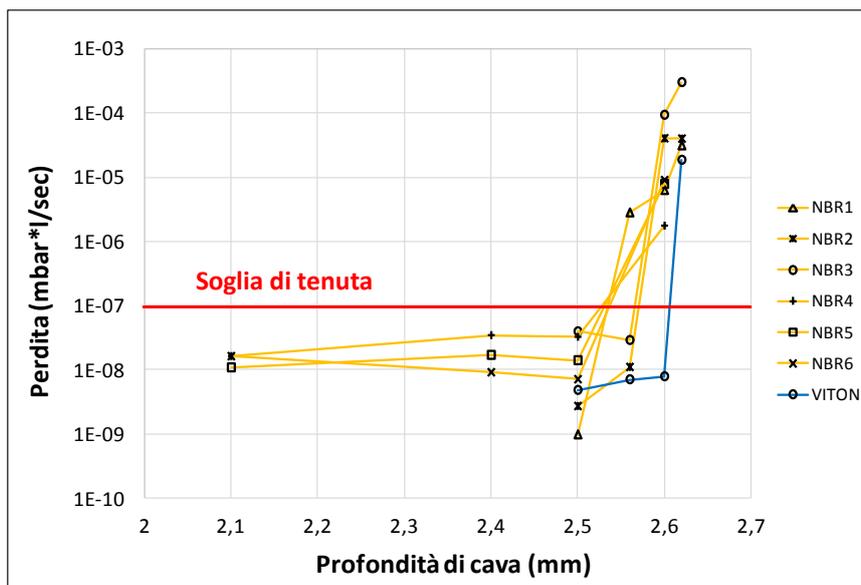


Figura 4. Risultati delle prove di tenuta a vuoto sugli O-ring

Per uno degli O-ring in NBR (NBR3) e per l'O-ring in VITONTM, le condizioni delle prove di tenuta sono state simulate ad elementi finiti mediante il codice ABAQUS ver.6.13, al fine di correlare la profondità di cava (e quindi lo squeeze degree) con la pressione di contatto tra O-ring e cava.

I modelli sono stati sviluppati con riferimento alle dimensioni effettive degli O-ring, misurate con un profilometro. La mesh è stata realizzata utilizzando 3874 elementi assialsimmetrici CAX4RH e CAX3H, infittiti (con dimensione tipica 0,03 mm) nelle zone di contatto tra O-ring e cava, supposta perfettamente rigida. Il contatto è stato simulato con attrito ($f=0,1$). Per i materiali degli O-ring è stato assunta una legge costitutiva iperelastica di tipo Mooney-Rivlin con l'ipotesi di incomprimibilità (eq. 1). Le costanti della legge sono state desunte da letteratura ([11], [12]) e riportate in tabella 2.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

Tabella 2. Costanti della legge di Mooney-Rivlin

Materiale O-ring	C_{10}	C_{01}
NBR	1,870	0,47
VITON	1,195	0,16

L'analisi si è svolta in tre step successivi (vedi fig.5): alloggiamento dell'O-ring nella cava (con interferenza), chiusura della flangia e applicazione della pressione atmosferica sul lato esterno.

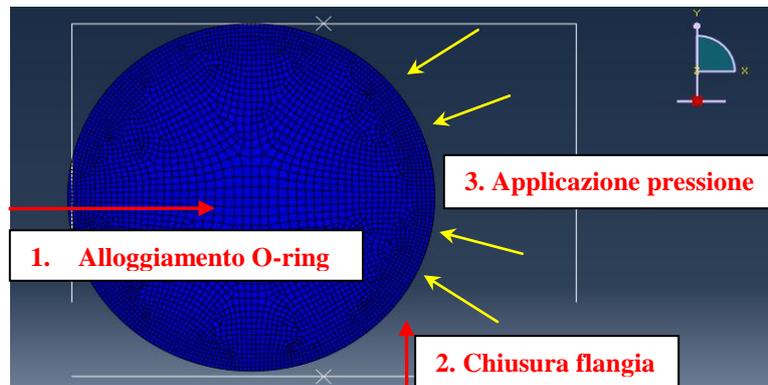


Figura 5. Modello e fasi della simulazione delle prove di tenuta a vuoto sugli O-ring

Per ciascuna delle profondità di cava esaminate è stata calcolata la pressione di tenuta p_{tenuta} , definita come il minore tra i due valori massimi p_{max1} e p_{max2} delle distribuzioni delle pressioni sulle superfici di contatto tra O-ring e cava, che si interpongono tra il fluido in pressione e il vuoto (vedi fig. 6):

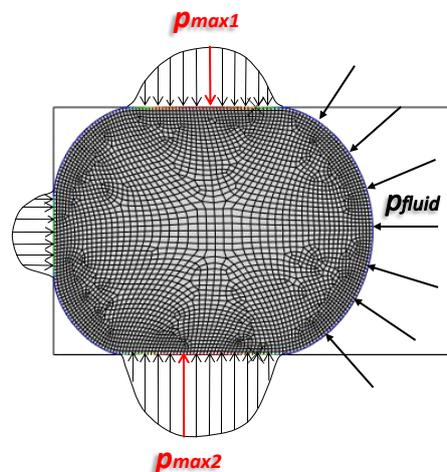


Figura 6. Schema delle distribuzioni delle pressioni applicate all'O-ring

In fig.7 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi numeriche espressi in termini di pressione di tenuta, sovrapposti a quelli delle prove di tenuta espressi in termini di perdita.

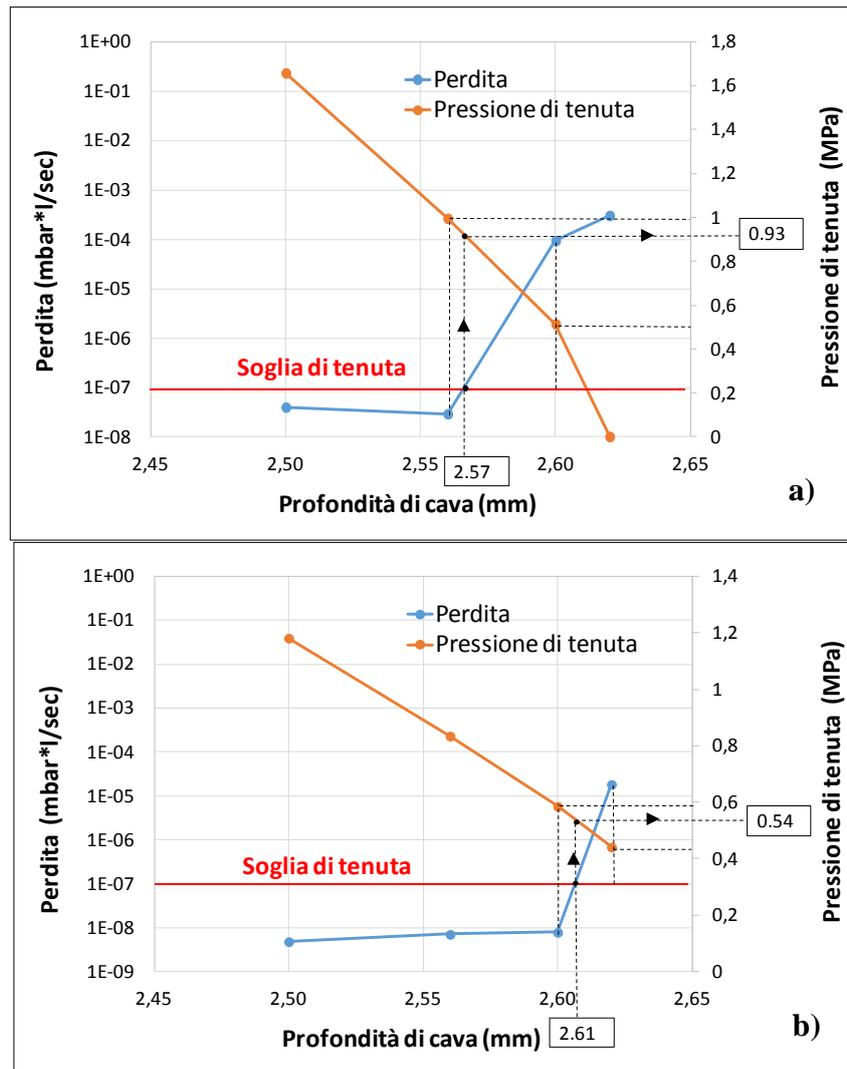


Figura 7. Risultati delle analisi FEM e delle prove di tenuta: a) O-ring in NBR, b) O-ring in VITON™

In corrispondenza dell'intersezione della curva di perdita con la soglia di tenuta, è possibile determinare il valore della pressione limite di tenuta, che garantisce il corretto funzionamento della guarnizione. La profondità di cava corrispondente alla soglia di tenuta presenta però un'incertezza, dovuta all'approssimazione lineare della curva di perdita: il range di valori entro cui può variare la pressione limite di tenuta, riportato in tab.3, è perciò quello corrispondente alla differenza tra le due profondità di cava a cavallo della soglia. In letteratura esistono pochissimi riscontri su questi risultati. In passato Sessink et al. [13] hanno stimato teoricamente la pressione di contatto con la cava di O-ring in NBR e VITON™ operanti a vuoto con precompressione standard, ottenendo un valore di 1,3 MPa nel caso più critico; riferendosi ad una condizione di esercizio normale e non al limite di tenuta, tale valore è però da intendersi un limite superiore della pressione limite di tenuta. Più recentemente, Gillen et al. [9] hanno effettuato una serie di prove di tenuta a vuoto su O-ring in gomma butilica, ottenendo valori della pressione limite di tenuta variabili tra 0,46 e 0,56 MPa, a seconda delle dimensioni delle guarnizioni da loro testate. Queste risultanze appaiono coerenti con i valori riportati in tabella 3 e inducono a ritenere che la pressione limite di tenuta sia sostanzialmente indipendente dal materiale dell'O-ring; il suo valore è stato pertanto assunto pari al minimo comune ai due materiali testati, ossia 0,51 MPa, e ritenuto valido anche per gli O-ring in EPDM studiati nella fase successiva.

Tabella 3. Range di variazione della pressione limite di tenuta [MPa]

Materiale O-ring	Min	Max
NBR	0,51	0,99
VITON™	0,44	0,59

4. DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL MATERIALE IN FUNZIONE DEL LIVELLO DI IRRAGGIAMENTO

In questa fase della ricerca si sono effettuate prove di trazione uni-assiale e prove di Compression Set su 4 serie di spezzoni ricavati da O-ring in EPDM. La prima serie non è stata irradiata per costituire il riferimento e le altre tre sono state irradiate con campi misti di neutroni e gamma per 30 min, 60 min e 120 min, corrispondenti rispettivamente alle dosi assorbite di 0,36 MGy, 0.71 MGy e 1,43 MG, al fine di valutare l'effetto del livello di dose sul comportamento meccanico del materiale. Gli irraggiamenti sono stati effettuati nel Canale Centrale del reattore di ricerca TRIGA MARK II del laboratorio LENA dell'Università di Pavia alla potenza nominale di 250 kW.

Le prove di trazione sono state effettuate a temperatura ambiente e con una velocità di spostamento della traversa di 10 mm/min su una macchina INSTRON 3366, predisponendo gli spezzoni di O-ring in modo da disporre di un tratto utile di 35 mm. I risultati di queste prove, riportati in fig.8 in termini di diagrammi sforzo-deformazione nominale, mostrano un progressivo hardening del materiale all'aumentare del livello di irraggiamento, con un'evidente riduzione della deformazione a rottura.

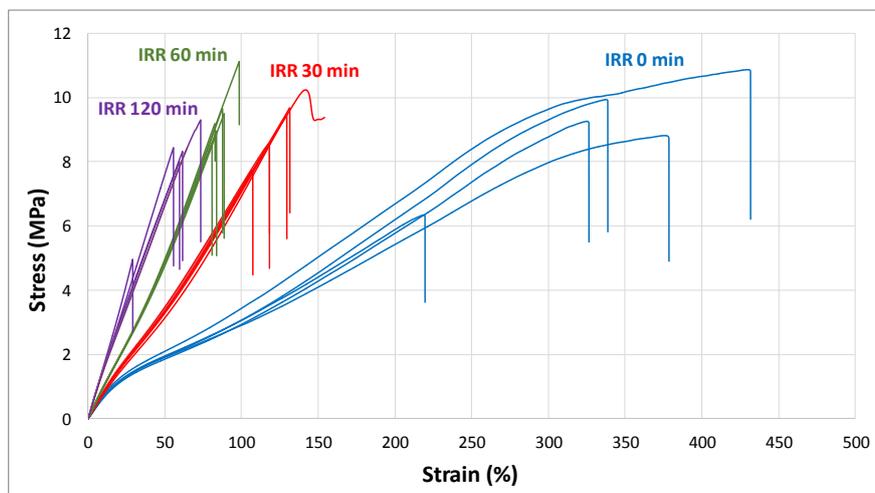


Figura 8. Diagrammi sforzo-deformazione nominale su spezzoni di O-ring in EPDM per diversi livelli di irraggiamento

Le prove di Compression Set sono state effettuate su spezzoni di O-ring di lunghezza pari a 52 mm, secondo le norme ASTM D1414-94 (03) [14] e ASTM D395-03 [15], utilizzando i seguenti parametri: schiacciamento 25%, riscaldamento a 100°C per 24 ore, tempo di rilassamento dopo lo scarico e prima della misura pari a 30 min. I risultati di queste prove sono riportati in fig.9 in termini di Compression Set (ossia di schiacciamento percentuale permanente, non recuperato alla scarico); tale parametro si mantiene a pochi punti percentuali per tutte le serie indicando che nell'intervallo di dosi investigato il materiale irraggiato conserva le sue caratteristiche di recupero elastico.

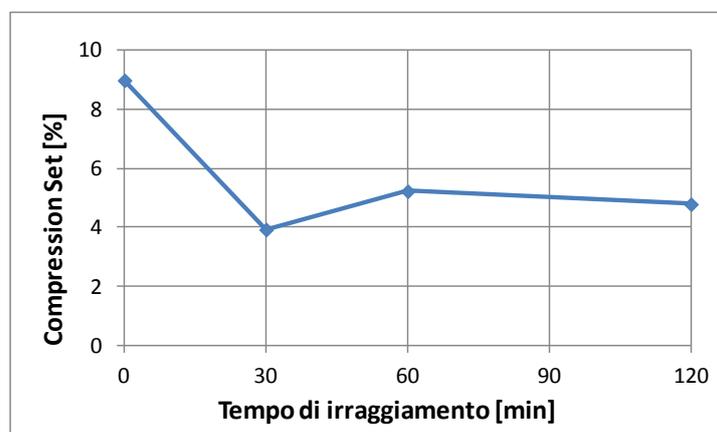


Figura 9. Compression Set su spezzoni di O-ring in EPDM per diversi livelli di irraggiamento

Seppur questa prova non rispecchi perfettamente il comportamento degli O-ring in esercizio, in quanto l'irraggiamento è stato effettuato prima e non durante la compressione, i risultati rappresentati in fig.9 fanno ipotizzare che un modello costitutivo di tipo iperelastico sia in grado di descrivere in prima approssimazione il comportamento del materiale per tutti i livelli di dose assorbita. Anche i diagrammi sforzo-deformazione di fig.8 sono stati perciò approssimati mediante leggi costitutive alla Mooney-Rivlin. I coefficienti così determinati (mediati per le prove della stessa serie) sono riportati in tabella 4.

Tabella 4. Costanti della legge di Mooney-Rivlin per l'EPDM a diversi livelli di irraggiamento

Tempo di irraggiamento [min]	C_{10}	C_{01}
0	1,150	-0,37
30	2,942	-0,188
60	4,665	-3,404
120	4,905	-2.339

5. PREVISIONE DELLA DURATA IN ESERCIZIO DEGLI O-RING

Per svolgere questa fase della ricerca si è utilizzato il modello FEM dell'O-ring descritto al paragrafo 3, ipotizzandolo realizzato in EPDM. Su tale O-ring, per le diverse profondità di cava di tabella 1 (tranne la 2.62 mm), sono state dapprima simulate la fasi di alloggiamento nella cava, chiusura della flangia e applicazione della pressione, utilizzando la legge costitutiva del materiale non irraggiato. Partendo da questa condizione (quindi con l'O-ring sotto carico), è stato poi simulato l'incremento della dose assorbita modificando progressivamente i coefficienti della legge di Mooney-Rivlin del materiale attraverso un'interpolazione dei valori di tabella 4. Il modello ha permesso in tal modo di determinare il progressivo cambiamento delle distribuzioni delle pressioni di contatto tra O-ring e cava, nonché dello stato di sollecitazione e di deformazione all'interno dell'O-ring.

5.1. Determinazione della condizione limite di tenuta

In fig.10 sono riportati gli andamenti della pressione di tenuta per le diverse profondità di cava all'aumentare del tempo di irraggiamento, confrontati con il valore della pressione limite di tenuta.

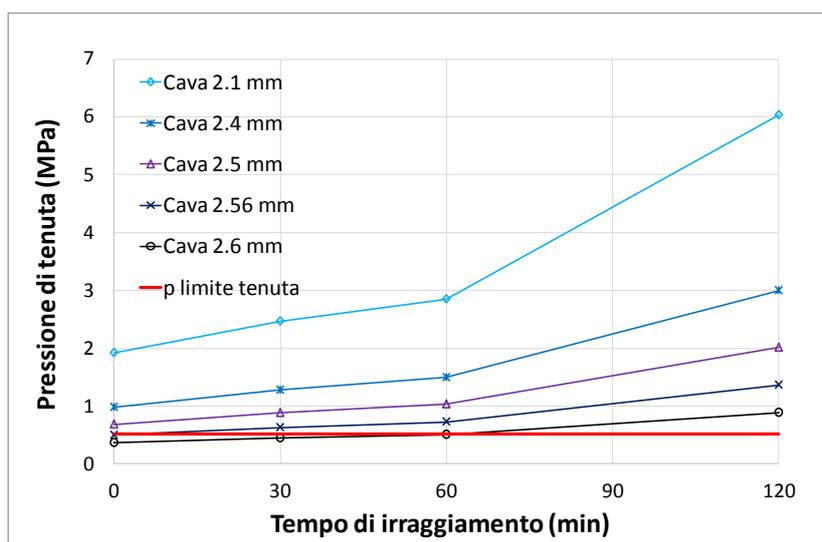


Figura 10. Pressione di tenuta in funzione del tempo di irraggiamento per le diverse profondità di cava e confronto con la pressione limite di tenuta

Per effetto dell'hardening del materiale, gli andamenti della pressione di tenuta sono sempre crescenti, scongiurando la perdita di tenuta nel tempo; la condizione più critica si ha perciò a tempo zero per le due cave di profondità maggiore. In particolare, la tenuta è assicurata per cave di profondità inferiore a 2,5 mm, che determinano una pressione di tenuta superiore al valore limite di 0.51 MPa.

5.2. Determinazione della condizione limite di resistenza

In fig.11 è invece riportato l'andamento della deformazione principale massima calcolata nell'O-ring (pressoché costante con il tempo di irraggiamento, trattandosi sostanzialmente di un problema a deformazione imposta), sovrapposto ai valori sperimentali della deformazione a rottura misurata nelle prove di trazione, qui riportati con i loro valori medi e le bande di errore.

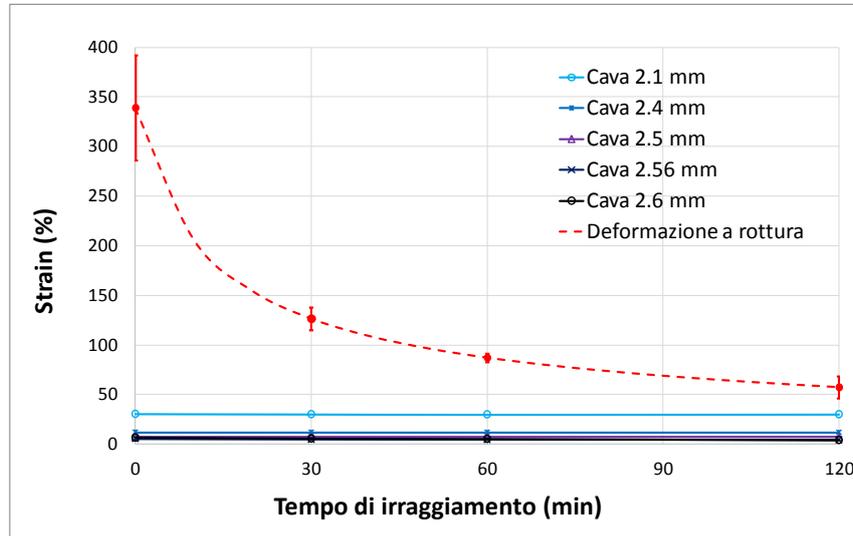


Figura 11. Deformazione principale massima in funzione del tempo di irraggiamento per le diverse profondità di cava e confronto con la deformazione a rottura

La riduzione della deformazione a rottura per effetto dell'irraggiamento costituisce il fenomeno critico per la resistenza strutturale dell'O-ring. Per determinarne il limite di utilizzo, i valori medi della deformazione a rottura sono stati approssimati con una funzione razionale di tipo polinomiale, successivamente estrapolata per cercarne l'intersezione con i valori delle deformazioni principali massime calcolate nell'O-ring.

5.3. Mappa di previsione della durata

I risultati di queste elaborazioni sono stati sintetizzati nella mappa di figura 12, dove le condizioni limite di utilizzo sono espresse in termini di tempo di irraggiamento in funzione della profondità di cava. La mappa evidenzia il campo del cedimento strutturale e di quello funzionale, definendo l'area di lavoro "sicura" dell'O-ring.

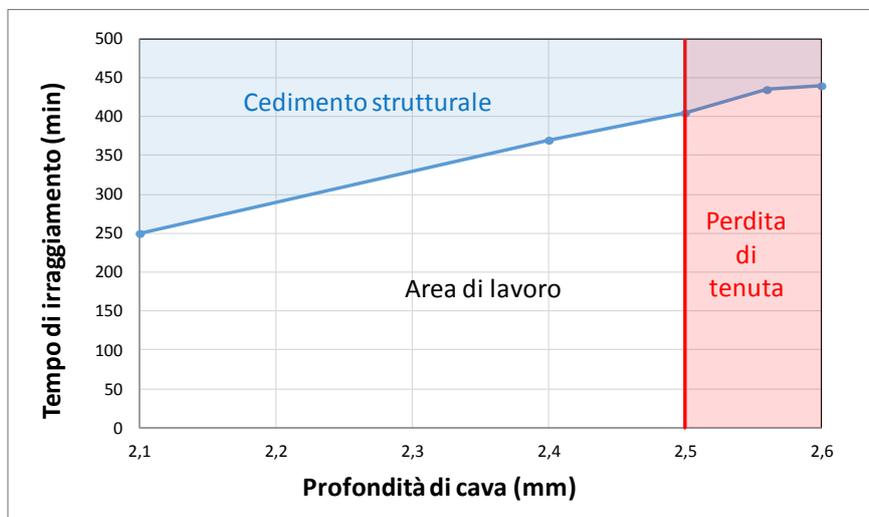


Figura 12. Mappa delle condizioni limite di utilizzo dell'O-ring

Nel valutare da un punto di vista quantitativo la mappa di fig.12, occorre ricordare che allo stato attuale essa è stata ottenuta schematizzando il materiale con leggi costitutive di tipo iperelastico, senza considerare perciò effetti viscosi e/o irreversibili (peraltro risultati trascurabili dalle prove di Compression Set), né effetti della temperatura, né variazioni di densità (shrinking o swelling). Di tali effetti si potrà tener conto con un successivo affinamento delle leggi costitutive, senza tuttavia modificare l'impostazione della procedura proposta.

6. CONCLUSIONI

La procedura per la previsione della vita utile degli O-Ring è stata sviluppata attraverso attività sperimentali e numeriche, i cui risultati posso essere così sintetizzati:

- le prove di tenuta integrati con modelli FEM hanno consentito di determinare la pressione di contatto tra O-ring e cava, in grado di garantire la tenuta. Il valore di tale pressione risulta in linea con i pochi risultati disponibili in letteratura;
- le prove di trazione uni-assiale e di Compression Set su spezzoni di O-ring in EPDM sottoposti preventivamente a diverse dosi in campi misti neutroni e gamma hanno evidenziato che l'irraggiamento determina un significativo hardening del materiale, con forte riduzione della deformazione a rottura, mentre non ne modifica sostanzialmente la risposta elastica;
- la simulazione del funzionamento degli O-ring in ambiente radioattivo ha consentito di determinare la variazione nel tempo della pressione di contatto tra O-ring e cava e dello stato di sforzo e deformazione nella guarnizione; confrontando la pressione di contatto con il suo valore limite di tenuta e la deformazione nell'O-ring con il suo valore a rottura, è stato proposto un approccio unificato che prevede la durata di utilizzo della guarnizione, sia in termini funzionali che strutturali. La mappa derivata da questa procedura costituisce un utile strumento per la programmazione della sostituzione degli O-ring in esercizio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Sealing elements -Technical Handbook-O-rings*, Eriks (www.eriks.info) (2013).
- [2] A. Karaszkiwicz, "Geometry and Contact pressure of an O-Ring Mounted in a Seal Groove", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 29, 2134-2137 (1990)
- [3] 'O' Ring Guide Issue 7, James Walker (www.jameswalker.biz) (2015)
- [4] R.Flitney, *Seals and Sealing Handbook*, ed. Elsevier (2014).
- [5] S.G. Burnay, J.W. Hitchon, "Prediction of Service Lifetimes of Elastomeric Seals During Radiation", *Journal of Nuclear Materials*, 131, 197-207 (1985).
- [6] V. Placek, T. Kohout, V.Hnat, B. Bartonicek, "Assessment of the EPDM Seal Lifetime in Nuclear Power Plants", *Polymer Testing*, 28, 209-214 (2009).
- [7] F. Le Lay, "Study on the Lifetime of EPDM Seals in Nuclear-Powered Vessels", *Radiation Physics and Chemistry*, 84, 210-217 (2013).
- [8] P. Beynel, P. Maier, H. Schönbacher, "Compilation of Radiation Damage Test Data: Materials Used around High-Energy Accelerators", *Yellow Report CERN 82-10, Part 3* (1982).
- [9] K.T. Gillen, R. Bernstein, M.H. Wilson, "Predicting and Confirming the Lifetime of O-Rings", *Polymer Degradation and Stability*, 89, 257-270 (2005).
- [10] *Vacuum Valves 2016*, VAT (www.vatvalve.com) (2016).
- [11] X.G. Song, L.Wang, Y.C. Park, "Analysis and optimization of nitrile butadiene rubber sealing mechanism of ball valve", *Trans. of Nonferrous Metals Society of China*, 19, s220-s224 (2009).
- [12] A. Makino, W.R. Hamburgen, J.S. Fitch, "Fluoroelastomer Pressure Pad Design for Microelectronic Applications", *Western Research Laboratory Research Report*, 93/7 (1993).
- [13] B.W.L.M. Sessink, N.F. Verster, "Design of Elastomer O-ring Vacuum Seals", *Vacuum*, 23, 319-325 (1973).
- [14] *ASTM D1414-94 (03): Standard Test Method for Rubber O-Rings*, ASTM (2003).
- [15] *ASTM D395-03: Standard Test Method for Rubber Property – Compression Set*, ASTM (2003).