

IL PROBLEMA DELLE PICCOLE CRICCHE
NELLA PRIMA PARETE DI UN REATTORE A FUSIONE

M. Merola¹, R. Matera²

- 1) Politecnico di Milano e Centro Comune di Ricerche,
Istituto per i Materiali Avanzati, TP 750, 21020 Ispra (Varese)
- 2) Centro Comune di Ricerche, Istituto per i Materiali Avanzati, TP 750,
21020 Ispra (Varese)

SOMMARIO

Il reattore sperimentale a fusione termonucleare controllata a confinamento magnetico di tipo tokamak, sarà caratterizzato da un funzionamento di tipo pulsato. La fatica termica costituisce pertanto una delle principali preoccupazioni per la durata di vita dei componenti che si affacciano al plasma come la prima parete ed il divertore. Inoltre il verificarsi di improvvise interruzioni della corrente del plasma, fa sì che l'energia termica e magnetica in esso contenuta si depositi su tali componenti creando delle microfusione localizzate con successivo innesco di cricche aventi profondità dell'ordine di qualche decina di μm . Il presente lavoro illustra l'attività condotta presso il Centro Comune di Ricerche di Ispra volta al fine di indagare sui possibili sinergismi fra la fatica termica e le disruzioni del plasma. Viene inoltre discusso l'impatto sul progetto della prima parete di tale interazione.

1. INTRODUZIONE

La ricerca europea volta al conseguimento della fusione termonucleare controllata, prevede la costruzione, per la fine di questo secolo, di un reattore sperimentale a confinamento magnetico di tipo tokamak denominato NET (Next European Torus). In alternativa ad esso, potrà essere decisa la costruzione del reattore ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) frutto della collaborazione tra la Comunità Europea, il Giappone, gli Stati Uniti e l'Unione Sovietica. Entrambi i progetti si pongono come finalità la dimostrazione della fattibilità tecnologica della fusione nucleare controllata ed entrambe le macchine presentano una modalità di

funzionamento intrinsecamente pulsato. La principale differenza fra i due progetti è la maggiore fluenza neutronica a fine vita ed il maggior numero di cicli operativi del reattore ITER. In conseguenza di ciò, tale macchina dovrà produrre parte del trizio necessario in un apposito componente detto 'breeding blanket'. I principali parametri di progetto del reattore ITER sono illustrati in tab. I [1-3].

Un componente di importanza fondamentale del reattore tokamak è la 'Prima Parete' (PP). Questa costituisce l'interfaccia fisico-strutturale fra il plasma ed il resto dell'impianto che lo produce e lo confina. L'insieme dei fenomeni che caratterizzano la mutua influenza fra tale fluido e la PP, costituisce il vasto capitolo noto nella letteratura scientifica come 'Plasma-First Wall Interaction'.

La PP viene sottoposta a 10^4 - 10^5 cicli operativi della durata di qualche centinaio di secondi, durante i quali la massima temperatura varia da 100 a 400 °C. Il materiale di riferimento per tale componente è l'acciaio austenitico AISI 316 L. Gli elevati gradienti termici che si sviluppano fra la superficie riscaldata e quella raffreddata, unitamente all'elevato numero di cicli, fanno sì che il fenomeno della fatica termica costituisca una delle cause che maggiormente limiteranno la durata di vita della PP [4]. Differente sarà la situazione relativa al reattore dimostrativo. Quest'ultimo sarà infatti caratterizzato da impulsi quasi stazionari; pertanto i problemi di fatica saranno sensibilmente ridotti mentre la fluenza neutronica sarà particolarmente elevata. In conseguenza di ciò, il danno da irraggiamento sarà di pochi 'displacements per atom' (dpa) per il NET e di una decina di dpa per l'ITER, mentre circa 60-70 dpa sono previsti per il reattore dimostrativo ed un valore ancora maggiore ($> 10^2$ dpa) per il commerciale [5].

La durata di vita del reattore sperimentale ITER/NET potrebbe essere ulteriormente ridotta dal verificarsi delle 'disruzioni del plasma'. Queste sono delle improvvise interruzioni della corrente del plasma, le cui cause non sono peraltro ancora del tutto note. Circa un migliaio di disruzioni sono previste per tale macchina. La conseguente deposizione dell'energia termica contenuta nel plasma stesso e dell'energia del campo magnetico poloidale in un tempo dell'ordine dei millisecondi provoca delle microfusione localizzate con evaporazione del materiale nel caso di una prima parete priva di rivestimenti protettivi. Durante la successiva fase di risolidificazione si assiste alla formazione di una popolazione di microcricche superficiali nella zona risolidificata. La piccola dimensione delle suddette cricche, la plasticizzazione ciclica della prima parete in conseguenza degli elevati sforzi termici, lo stato biassiale della sollecitazione, la variazione temporale della temperatura, la presenza di forti tensioni residue nella zona risolidificata, la marcata alterazione microstrutturale del materiale, lo stato di sollecitazione puramente secondario, i forti gradienti di tensione lungo lo spessore della prima parete, il ciclo di fatica alternata ma non simmetrica, rendono estremamente complesso lo studio teorico dell'interazione fra fatica termica e disruzioni del plasma. Tale studio è ulteriormente complicato dalla variazione del rapporto $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ durante la vita del componente.

Infatti, al primo ciclo di fatica R assume il valore $-\infty$ per poi assestarsi intorno al valore -1 in seguito alle deformazioni plastiche superficiali dovute agli elevati sforzi termici ed alla relativamente alta temperatura. A tale effetto si aggiunge l'azione del creep da irraggiamento, sensibile anche nel reattore ITER/NET, che, agendo solo nella fase calda del ciclo, porta ad un progressivo innalzamento del valore di R che tende così ad assumere valori negativi sempre più piccoli.

Al Centro Comune di Ricerche di Ispra viene pertanto svolta un'attività sperimentale che simula gli effetti termici delle instabilità del plasma bombardando con un cannone elettronico dei modelli semplificati di PP. Tali componenti vengono poi sottoposti a cicli di fatica termica in un apposito laboratorio sperimentale. Il tasso di crescita delle cricche viene quindi misurato on-line possibilmente mediante l'impiego del potential drop method.

Lo scopo del presente lavoro è di descrivere l'attività attualmente in corso e di illustrare i primi risultati ottenuti.

Per quanto concerne l'interazione creep da irraggiamento - fatica termica è in corso un'attività sperimentale parallela condotta presso il ciclotrone MC-40 i cui dettagli possono essere trovati in bibliografia [6-8].

2. INTERAZIONE FATICA TERMICA - DISRUZIONI DEL PLASMA

Studi teorico-numeriche svolti in passato [3, 9] hanno previsto che le microcricche che si enucleano durante le disruzioni del plasma, costituiscono un innesco per la rottura prematura della PP con una riduzione di circa un ordine di grandezza sui cicli di durata di vita di tale componente. Al fine di evitare tale conseguenza, oltre che per migliorare il controllo delle impurezze specie durante l'avviamento, si è finora ritenuto opportuno proteggere, almeno parzialmente, la PP con delle tegole di grafite. Tale soluzione presenta però notevoli controindicazioni. Infatti l'acqua di raffreddamento della PP potrebbe costituire un potenziale rischio se, in caso di incidente, dovesse venire a contatto con la suddetta grafite avendo quest'ultima una temperatura di esercizio molto elevata (da 1000 a 2000 °C a seconda del meccanismo di collegamento prescelto con la PP sottostante). Inoltre il problema di come unire le tegole protettive alla struttura metallica assicurando un buon contatto termico per tutti i cicli di fatica ed una loro agevole sostituzione mediante manipolazione remota in caso di danneggiamento, non è stato ancora completamente risolto.

Recentemente si sono posti dei dubbi riguardo la reale necessità di una tegolatura [10]. Tali perplessità si basano sul fatto che una cricca non propaga necessariamente fino alla rottura del componente in un campo di sollecitazioni puramente secondarie caratterizzate da elevati gradienti termici con inversione del segno delle tensioni lungo lo spessore. Infatti fra la superficie riscaldata che si affaccia al plasma ed i canali di raffreddamento si ha un piano di sforzi nulli nel quale si passa da uno stato di compressione che caratterizza la zona verso il plasma ad uno stato di tensione tipico della superficie raffreddata. La suddetta ipotesi di arresto della propagazione trova parziale conferma in un recente lavoro [11], sebbene quest'ultimo si riferisca ad una differente geometria (cilindrica) ed ad un diverso materiale (acciaio al Cr-Mo).

Inoltre una cricca situata sulla superficie riscaldata è sottoposta ad un ciclo di sollecitazioni caratterizzato da un valore di R negativo cosicché l'effetto di 'crack closure' potrebbe ulteriormente rallentare il tasso di crescita. La piccola dimensione delle cricche e la estesa plasticizzazione della PP impediscono l'applicazione della LEFM, mentre del resto nemmeno la EPFM può essere applicata a causa delle variazioni metallurgiche causate dalla fusione superficiale del componente.

Appare pertanto chiara la necessità di una ricerca teorica e sperimentale al fine di valutare il reale comportamento di tali microcricche superficiali e quindi la effettiva necessità di una tegolatura protettiva per la PP.

3. DESCRIZIONE DEL PROGRAMMA DI RICERCA

Il programma di ricerca si articola nei seguenti punti:

- scelta della disruzione di riferimento;
- caratterizzazione su base statistica della forma e delle dimensioni delle microcricche enucleatesi;
- applicazione dell' impulso di riferimento su un modello di PP privo di rivestimenti protettivi e successivo ciclaggio a fatica termica del componente;
- misura del tasso di avanzamento delle cricche con tecniche non distruttive, possibilmente mediante il potential drop method;
- valutazione dell' interazione delle suddette microcricche con la vita a fatica del componente.

3.1 Scelta della disruzione di riferimento

Durante una disruzione del plasma viene depositata sulla PP l' energia termica contenuta nel plasma stesso e l' energia del campo magnetico poloidale. Tali energie si depositano sui componenti che si affacciano al plasma con una distribuzione spaziale non uniforme e con una scala temporale dell' ordine dei millisecondi. Assumendo le condizioni operative più critiche del reattore ITER e prendendo come riferimento i valori più conservativi relativi alle disruzioni del plasma, si sono scelti i seguenti parametri [10, 12]:

deposizione di energia: 4.3 MJ/m²;
durata dell' impulso: 15 ms.

Le disruzioni del plasma vengono simulate mediante un cannone elettronico avente una potenza massima di 30 KW con un diametro massimo dello spot di 8 mm [13]. Nel presente lavoro si è impiegato un fascio avente un diametro di 6.5 mm. Gli impulsi sono stati effettuati in un' apposita camera a vuoto (10⁻³ Pa).

3.3 Caratterizzazione delle microcricche enucleate

Mediante un' analisi distruttiva si sono caratterizzate le microcricche enucleatesi durante la fase di risolidificazione. La fig. 1 mostra la zona fusa. Questa presenta una profondità massima di 350 μm, il che risulta in ottimo accordo con i modelli teorici esistenti [14]. Durante la fase di risolidificazione si enucleano una popolazione di microcricche (fig. 2) aventi profondità massima di 30-40 μm ed una apertura superficiale inferiore a 10 μm. La forma è quasi rettangolare.

3.4 Condizioni sperimentali della prova di fatica termica

Lo spot di riferimento è stato applicato su di un modello di PP (fig. 3) che verrà sottoposto a cicli di fatica termica nel laboratorio sperimentale del Centro Comune di Ricerche di Ispra [15, 16]. La freccia indica il punto in cui viene effettuato l' impulso. Tale componente è costituito da un blocco di acciaio austenitico della serie AISI 316 L nel quale sono stati ricavati due canali di raffreddamento in cui viene fatta circolare acqua demineralizzata. Un flusso termico superficiale variabile da

un valore nullo ad un valore di circa 600 KW/m^2 viene applicato sulla superficie indicata in fig. 3. Un' analisi numerica dell' esperienza è stata effettuata mediante la tecnica degli elementi finiti. Si è utilizzato un modello analitico bidimensionale formato da 129 nodi e 33 elementi isoparametrici ad 8 nodi. Il calcolo termico in stato stazionario è stato svolto assumendo le seguenti condizioni:

flusso termico superficiale: 600 KW/m^2 ;
coefficiente di scambio termico convettivo: $13 \text{ KW/m}^2\text{C}$;
temperatura dell' acqua di raffreddamento: $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

La fig. 4 mostra l' andamento delle isoterme. Nel punto dell' impulso si ha una massima temperatura calcolata di $476 \text{ }^\circ\text{C}$. Il calcolo meccanico elastico è stato svolto utilizzando l' approssimazione modellistica del generalised plane strain. La fig. 5 mostra l' andamento delle isostress elastico equivalenti di Von Mises. Le sollecitazioni principali σ_1 , σ_2 e σ_3 coincidono con gli assi 1, 2 e 3 della figura e nel punto dello spot hanno un valore massimo di -390 , -2 , -512 MPa rispettivamente. Come si può notare lo stato di sollecitazione è praticamente biassiale. Il punto più sollecitato della sezione risulta essere all' interno del canale di raffreddamento. Per quest' ultimo si è calcolata una temperatura massima di $85 \text{ }^\circ\text{C}$ e dei valori di sollecitazioni principali pari a 828 , 47 e 669 MPa .

4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Applicando la normativa nucleare americana ASME al componente in esame, si ricava che il massimo numero di cicli di fatica ammissibili è pari a 17000 per il punto più sollecitato e 98000 per il punto in cui viene applicato l' impulso. E' evidente pertanto che anche se una cricca riuscisse ad attraversare il piano di sollecitazioni nullo, la tegolatura protettiva sarebbe comunque non necessaria nel caso che si dimostrasse che la rottura della PP dipendesse prioritariamente da cricche propagatesi dai canali di raffreddamento. Il verificarsi di questa ipotesi è difficilmente prevedibile mediante considerazioni teorico numeriche. Infatti sebbene il punto più sollecitato abbia un numero di cicli ammissibili inferiore, occorre sottolineare che nel punto della disruzione si ha già la presenza di una microcricca e che pertanto la fase di nucleazione non si verifica. Si è già evidenziato nel paragrafo 2. che ciò comporta una riduzione di circa un ordine di grandezza della durata di vita, e questo è in accordo del resto con la nota regola del 10 % [17]. I suddetti 98000 cicli potrebbero pertanto ridursi a 9800 che è inferiore al valore del punto più sollecitato. Tali considerazioni sono però soggette alle critiche evidenziate nell' introduzione del presente lavoro.

In definitiva solo un' analisi dei risultati della prova di fatica termica potrà fornire indicazioni utili al progettista e indicare le strategie ottimali per garantire un' adeguata durata di vita della PP.

5. SVILUPPI FUTURI DEL LAVORO

La prova di fatica termica dovrebbe iniziare entro l' estate del 1991. Per quanto concerne la misura della velocità di propagazione delle cricche sono attualmente in corso delle prove per valutare la possibilità di applicare il potential drop method. La principale difficoltà risiede

nell' impedire che i fili che prelevano il segnale siano danneggiati dall' elevato flusso termico diretto a cui sono esposti. Si sta anche valutando l' impiego di CCD micro-camere per l' ispezione visuale della superficie danneggiata.

Al termine della prova di fatica verrà effettuata un' analisi metallografica del componente danneggiato.

6. CONCLUSIONI

L' analisi delle condizioni operative in cui dovrebbe propagare una microcricca generata da una disruzione del plasma porta a delle perplessità sul reale pericolo di una rottura catastrofica della PP. Inoltre, la soluzione di proteggere parte o tutta la PP con delle tegole protettive, costituisce una complicazione non indifferente del progetto e non ha ancora, del resto, trovato una soluzione esente da critiche. Presso il Centro Comune di Ricerca di Ispra è pertanto in corso un' attività sperimentale per valutare l' effettiva pericolosità delle suddette cricche in relazione alla vita a fatica del componente stesso. Qualora si dimostrasse che tali difetti non propagassero in maniera catastrofica, le tegole protettive potrebbero essere sostituite con un apposito 'coating' per garantire comunque un buon controllo delle impurezze e prevenire l' espulsione del metallo liquefatto durante una disruzione del plasma.

BIBLIOGRAFIA

1. *ITER Concept Definition*, IAEA Vol. 2 No. 3, Vienna, Austria, 1989.
2. *ITER Conceptual Design: Interim Report*, No. 7, Vienna, Austria, 1990.
3. *Next European Torus*, "Fusion Techn.", Vol. 14, 1988.
4. G. Vieider, M. Harrison, F. Moons, *NET Plasma Facing Components*, "Fusion Technology 1988", atti 15th SOFT, 1, 125-138, Pergamon Press, Oxford, 1989.
5. M. Merola, R. Matera, *Design Problems of the NET/ITER Experimental Reactor First Wall*, "Energia Nucleare", 1991, in stampa.
6. R. Scholz, G. Bergamo, M. Merola, R. Matera, *Sperimentazione ed analisi numerica della interazione tra fatica e creep da irraggiamento*, atti Conf. Naz. Ricerca, Sviluppo e Tecnologie dei materiali per i Reattori a Fusione, Frascati (RM), dicembre 1990.
7. G. Bergamo, *Interazione tra creep da irraggiamento e fatica nell' acciaio AISI 316 L 20% CW*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 1991.
8. R. Scholz, *Light Ion Irradiation Creep in Torsion*, Comm. Eur. Comm. EUR 11632 EN, Ispra Site, 1988.
9. E. Diegele, T. Fett, D. Munz, H. Stamm, *Stress and Lifetime Calculations for First Wall and Blanket Structural Components*, KfK Report, Karlsruhe, settembre 1986.

10. M. Matera, M. Merola, *Preliminary Theoretical and Experimental Study of the Effects of Plasma Disruptions on Thermal Fatigue Lifetime of the ITER First Wall*, II Simp. Int. su Fusion Nuclear Technology, ISFNT 2, Karlsruhe, giugno 1991, accettato per la presentazione, in corso di pubblicazione su "Fusion Engineering and Design".
11. H. Burret, S. Vasseur, J. Besson, A. Pineau, *Crack Growth Behaviour in a Thermal Fatigue Test. Experiments and Calculations*, "Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.", Vol. 12, No. 2, pp. 123-133, 1989.
12. *ITER Concept Definition*, IAEA, Vol. 2, No. 3, pp. 165-168, Vienna, 1989.
13. D. Quataer, B. Looman, F. Brossa, P. Schiller, *Disruption Simulation with Beam Pulses*, in corso di pubblicazione.
14. D. Quataert, F. Brossa, P. Schiller, G. Rigon, *Calculation of Melt Penetration during Short E.B. Pulses*, Comm. Eur. Commun., TN I.88.123, ottobre 1988.
15. R. Matera, M. Merola, M. Biggio, E. Cicchetti, V. Renda, M. Eto, *Behaviour of First Wall Components under Thermal Fatigue*, "Journal of Nucl. Mater.", Vol. 176, 1990, in stampa.
16. R. Matera, M. Merola, *Laboratorio sperimentale per prove di fatica termica*, atti del XIX Conv. Naz. AIAS su Meccanica dei Materiali Innovativi, Pisa, aprile 1991.
17. S.S. Manson, G.R. Halford, *A Method of Estimating High Temperature Low Cycle Fatigue Behaviour of Materials*, atti Conf. Int. su Thermal & High Strain Fatigue, Metals & Metallurgy Trust, Londra, pp. 154-170, 1967.

TAB. I - Principali parametri di progetto del reattore ITER

Raggio maggiore del plasma (m).....	6.0
Raggio minore del plasma (m).....	2.15
Corrente del plasma (MA).....	22/18
Campo magnetico toroidale sull' asse (T).....	4.85
Volume del plasma (m ³).....	1079
Numero di cicli operativi.....	3-7 10 ⁴
Numero di disruzioni 'major'.....	10 ³
Potenza termica (MW).....	1000
Carico termico sulla PP (MW/m ²).....	1.0
Fluenza neutronica termica a fine vita (MWy/m ²).....	1.0
Flusso termico superficiale medio sulla PP (MW/m ²).....	0.15
Flusso termico superficiale di picco sulla PP (MW/m ²).....	0.60
Deposizione di calore volumico sulla PP (MW/m ³).....	15

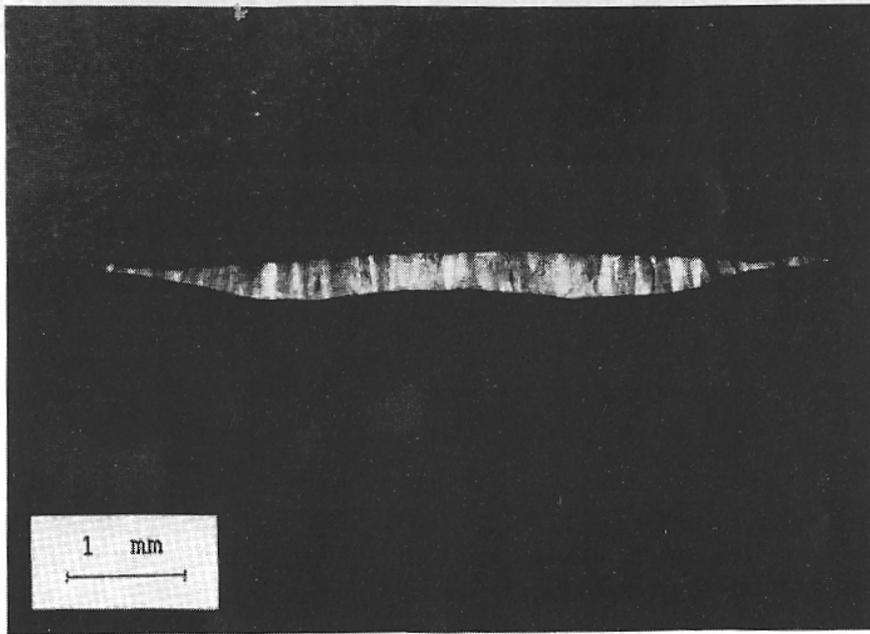


Fig. 1 - Simulazione di una disruzione del plasma su di un campione di AISI 316 L. Sezione della zona fusa. Fotografia effettuata con il microscopio ottico.

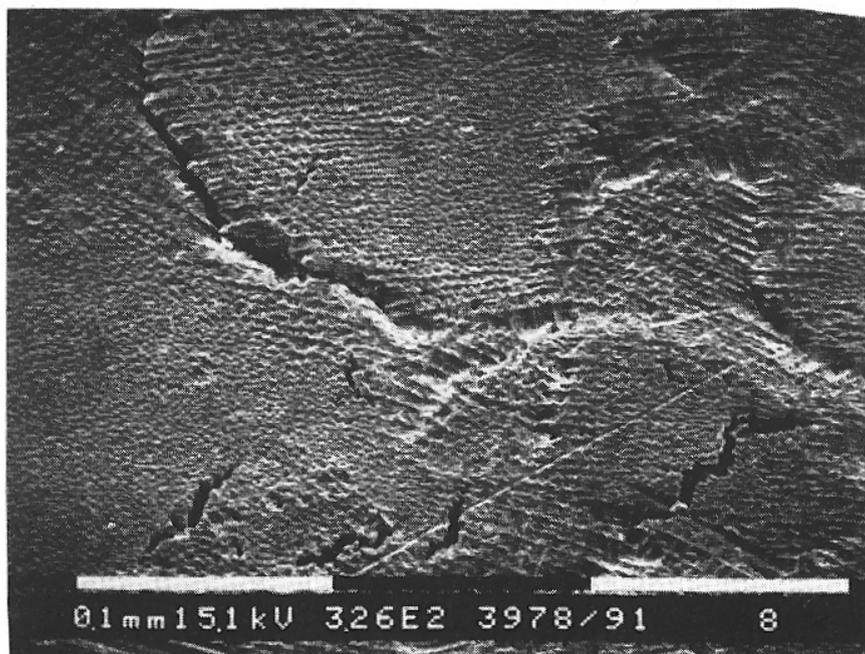


Fig. 2 - Popolazione delle microcricche superficiali enucleatesi durante la fase di risolidificazione. Fotografia ottenuta mediante il microscopio a scansione elettronica.

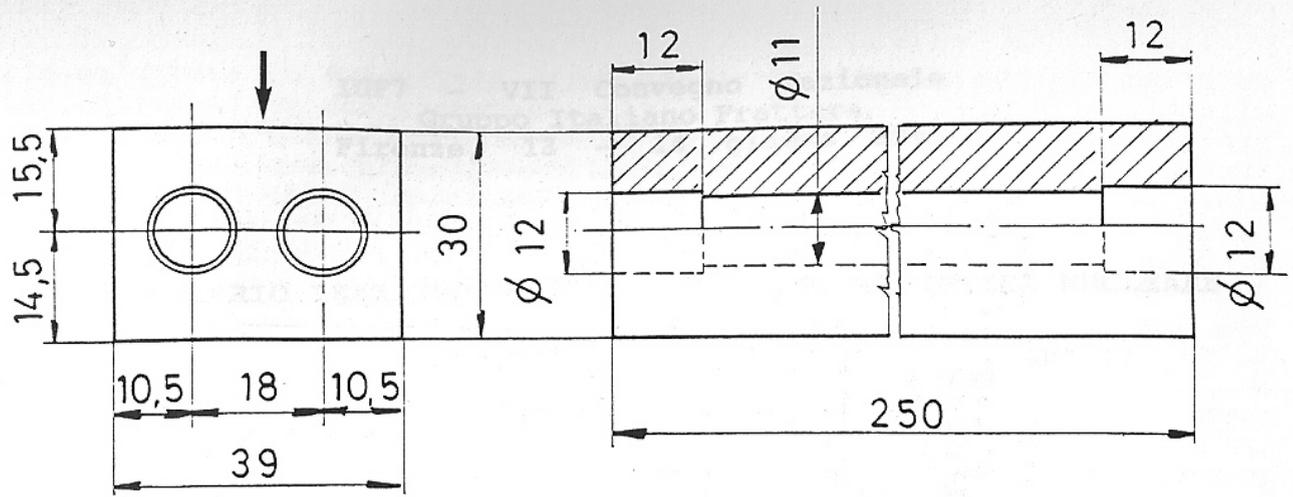


Fig. 3 - Modello di prima parete in AISI 316 L. La freccia indica il punto in cui viene applicato lo spot e la superficie sulle quale viene fatto incidere il flusso termico. Le dimensioni sono in mm.

TEMP	VALUE
1	+5.00E-05
2	+5.00E+01
3	+1.00E+02
4	+1.50E+02
5	+2.00E+02
6	+2.50E+02
7	+3.00E+02
8	+3.50E+02
9	+4.00E+02
10	+4.50E+02
11	+5.00E+02

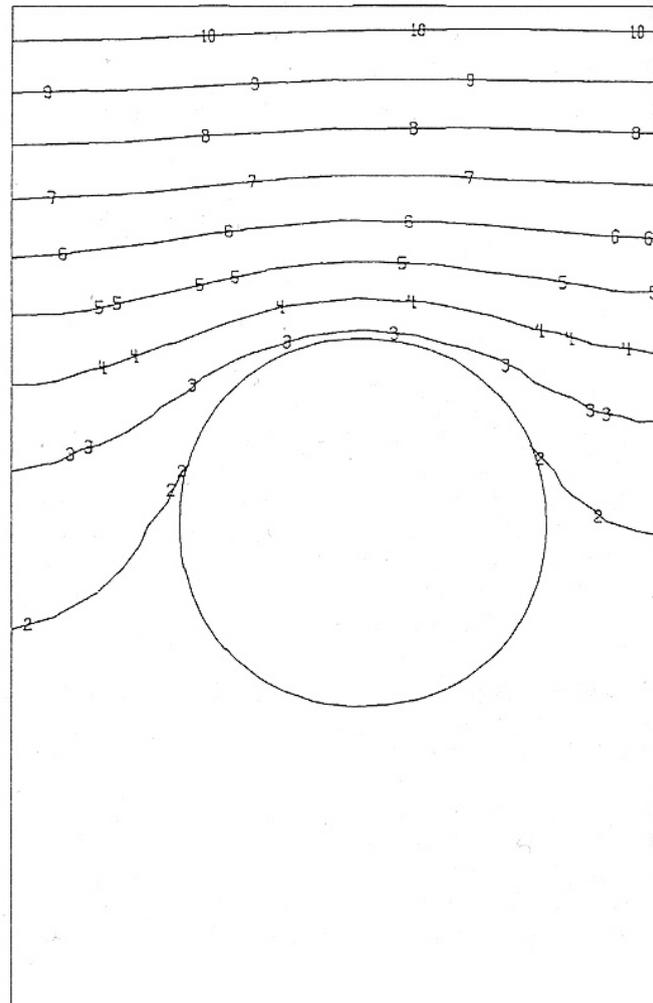
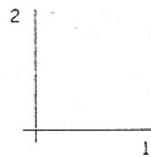


Fig. 4 - Analisi numerica termica: andamento delle isoterme.

MISES

	VALUE
1	+7.00E-05
2	+7.00E+01
3	+1.40E+02
4	+2.10E+02
5	+2.80E+02
6	+3.50E+02
7	+4.20E+02
8	+4.90E+02
9	+5.60E+02
10	+6.30E+02
11	+7.00E+02

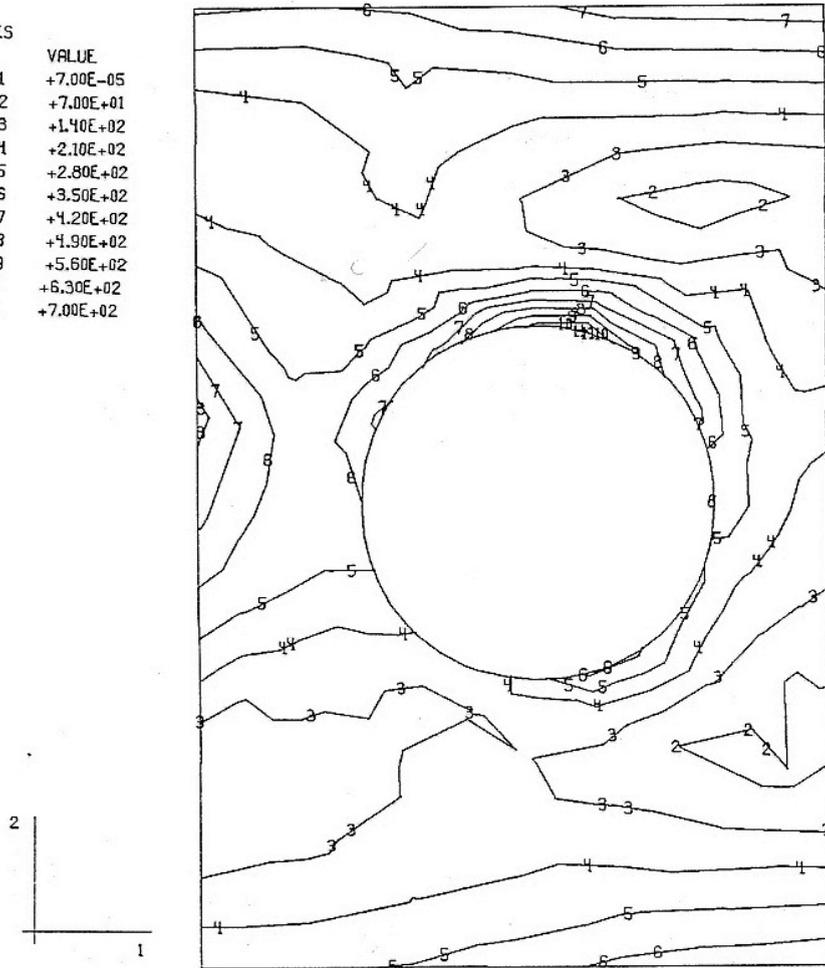


Fig. 5 - Analisi numerica meccanica: andamento delle isostress elastico equivalenti di Von Mises. I valori sono espressi in MPa.