

Titolo

Verifica della validità del diagramma di "efficacità" in RCC-MRx

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

Argomenti trattati: Normativa RCC-MRx, Reattori di IV generazione, Meccanica dei materiali, Normativa ASME

Sommario

Il lavoro che viene presentato in questo documento la descrizione della struttura della nuova normativa Francese RCC-MRx, in particolare della nuova versione Draft 2010 della AFCEN. Vista la complessità del documento viene data una presentazione della struttura, dello scopo e dei vari tomi della norma RCC-MRx.

Viene quindi svolta una analisi dettagliata dei metodi per la valutazione della deformazione progressiva (Ratcheting) e della norma Efficiency Diagram riportati nelle RCC-MRx. In particolare vengono descritti i criteri applicabili per la prevenzione del danneggiamento nei casi di creep significativo, creep trascurabile ed in presenza o meno di irraggiamento.

Viene quindi data una descrizione dettagliata delle norme ASME equivalenti (ASME Sezione NH appendice T) per analisi elastiche ed analisi inelastiche semplificate..

Infine viene data una comparazione sintetica delle due norme per alcune combinazioni di carico con evidenziazione delle peculiarità e dei possibili conservativismi.


Note

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	20-09-2011	NOME	Franco Corsi M.E. Angiolini	Massimo Sepielli <i>Re pl</i>	Paride Meloni
			FIRMA	<i>M.E. Angiolini</i>		<i>PM</i>
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

Indice

Introduzione	6
1 Descrizione delle RCC-MRx	7
1.1 Scopo e struttura delle norme RCC-MRx	7
2 Sezione I	11
2.1 Disposizione generali RDG 2000	11
2.2 Documenti da produrre RDG 3000	13
2.3 Entrance Keys per le RCC-MRx RDG 4000	15
2.4 Sistema di gestione RDG 5000	17
3 Sezione II	18
3.1 Requisiti aggiuntivi per l'uso degli standards europei REC 2000	18
3.2 Istruzioni speciali per componenti soggetti a diversa regolamentazione REC 3000	19
4 Sezione III	20
4.1 Tomo 1: Norme per il progetto e la costruzione	20
Struttura base delle sottosezioni B, C, D, K, L	21
4.1.1 Capitolo 1000: Introduzione	21
4.1.2 Capitolo 2000: Materiali utilizzabili per la costruzione dei componenti	21
4.1.3 Capitolo 3000: Norme per il progetto	22
4.1.4 Capitolo 4000: Norme per la fabbricazione e le verifiche	28
4.1.5 Capitolo 5000: Test	30
4.2 Tomo 2: Materiali	30
4.3 Tomo 3: Metodi di analisi distruttivi e non distruttivi	31
4.4 Tomo 4: Saldature	32
4.5 Tomo 5: Manifattura	33

5	Ratcheting ed Efficiency Diagram	35
5.1	Introduzione Generale	35
5.1.1	Metodi di analisi	35
5.1.2	Criteri applicabili	36
5.2	Terminologia legata all'analisi strutturale	37
5.2.1	Discontinuità geometriche	37
5.2.2	Ciclaggi	38
5.2.3	Comportamento strutturale	39
5.2.4	Sollecitazioni	40
5.2.5	Elastic Follow-Up	47
5.2.6	Usage fraction	47
5.2.7	Deformazioni	48
5.2.8	Carico di collasso	49
5.2.9	Integrale J	50
5.3	Metodi di analisi	50
5.4	Criteri per la prevenzione di danneggiamenti di Tipo P	50
5.5	Criteri per la prevenzione di danneggiamenti di Tipo S	51
5.6	Creep trascurabile RB 3261	52
5.6.1	Irraggiamento trascurabile	52
5.6.2	Irraggiamento significativo	65
5.7	Creep significativo RB 3262	65
5.7.1	Irraggiamento trascurabile	65
6	La normativa ASME per il ratcheting	73
6.1	Analisi Elastica	75
6.1.1	ASME NH Appendix T-1322 : Test No. A-1	75
6.1.2	ASME NH Appendix T-1323 : Test No. A-2	75
6.1.3	ASME NH Appendix T-1324 : Test No. A-3	75
6.2	Analisi Inelastica semplificata	79
6.2.1	ASME NH Appendix T-1332 : Test Nos. B-1 and B-2	80
6.2.2	ASME NH Appendix T-1333 : Test No. B-3	83
7	Confronto tra ASME e RCC-MRx	85
7.1	Primo Caso	88
7.2	Secondo Caso	93
	Bibliografia	99

Elenco delle figure

5.1	Supporting Line Segment	40
5.2	Breakdown degli sforzi	42
5.3	Sollecitazioni	45
5.4	Determinazione grafica di $(\sigma_m)_N$ e di E_t	56
5.5	Determinazione grafica di $(\sigma_L + \sigma_b)_N$ e di E'_t	56
5.6	Efficiency Diagram	57
5.7	Procedura grafica per ottenere v	58
5.8	Metodo 1a per l'analisi elasto-plastica	61
5.9	Metodo 1b per l'analisi elasto-plastica	63
5.10	Descrizione metodo 2	64
5.11	Determinazione grafica di $(\sigma_m)_N$ e di E_t	69
5.12	Determinazione grafica di $(\sigma_L + \Phi\sigma_b)_N$ e di E'_t	69
5.13	Procedura grafica per ottenere v	71
6.1	ASME - Sollecitazione minima a rottura	78
6.2	Bree diagram 1	81
6.3	Bree diagram 1	82
6.4	Curve isocrone sollecitazione-deformazione 1	82
6.5	Curve isocrone sollecitazione-deformazione 2	83
7.1	Applicazione RCC-MRx	86
7.2	Confronto $T_{mean} = 400^\circ\text{C}$	91
7.3	Confronto $T_{mean} = 450^\circ\text{C}$	91
7.4	Confronto $T_{mean} = 500^\circ\text{C}$	92
7.5	Confronto ASME / RCC-MRx	93
7.6	Caso 2:Confronto $T_{mean} = 400^\circ\text{C}$	95
7.7	Caso 2:Confronto $T_{mean} = 450^\circ\text{C}$	96
7.8	Caso 2:Confronto $T_{mean} = 500^\circ\text{C}$	97
7.9	Caso 2:Confronto ASME / RCC-MRx	97
7.10	Confronto ASME / RCC-MRx per le due analisi	98

Elenco delle tabelle

5.1	Regole applicabili in caso di Creep trascurabile	37
5.2	Regole applicabili in caso di Creep significativo	37
5.3	Riferimenti per le norme che prevengono danneggiamenti di tipo P	51
6.1	Temperature Test No. A-2	76
6.2	Temperatura applicabili per i Test Nos. B-1 e B-2	80
7.1	Confronto tra ASME ed RCC-MRx	89
7.2	Tabella $T_{mean} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	90
7.3	Tabella $T_{mean} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$	90
7.4	Tabella $T_{mean} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	92
7.5	Confronto tra ASME ed RCC-MRx	94
7.6	Tabella $T_{mean} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	95
7.7	Tabella $T_{mean} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$	96
7.8	Tabella $T_{mean} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	96

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 6/99
--	---	------------------	----------------------	------------------------

Introduzione

Il lavoro che viene presentato in questo documento ha riguardato più fasi successive:

- a) Una descrizione della struttura della nuova normativa Francese RCC-MRx, in particolare della nuova versione *Draft 2010* della *AFCEN* (da poco acquisita). Vista la complessità del documento, è stata data una presentazione della struttura, dello scopo e dei vari tomi della norma RCC-MRx. Capitoli 1,2,3,4.
- b) Una analisi dettagliata dei metodi per la valutazione della *Deformazione progressiva* (Ratcheting) e della norma *Efficiency Diagram* riportati nelle RCC-MRx. Capitolo 5. In particolare vengono descritti i criteri applicabili per la prevenzione del danneggiamento nei casi di *creep* significativo o trascurabile ed in presenza o meno di irraggiamento.
- c) Una descrizione dettagliata delle norme *ASME* equivalenti (ASME Section NH appendix T) per analisi elastiche ed analisi inelastiche semplificate. Capitolo 6.
- d) Una comparazione sintetica delle due norme per alcune combinazioni di carico con evidenziazione delle peculiarità e dei possibili conservativismi. Capitolo 7.

Capitolo 1

Descrizione delle RCC-MRx¹

Le norme per il progetto e la costruzione di installazioni nucleari, **RCC Codes**, si applicano principalmente ai componenti in classe di sicurezza. Queste norme vengono utilizzate come base per le relazioni contrattuali tra cliente e fornitore, ed in questo caso vengono accompagnate dalla lista dei componenti a cui vengono applicate.

Le **RCC-MRx**, sviluppate in particolare per i Reattori Veloci a Sodio (SFR), per i Reattori di Ricerca (RR) e per i Reattori a Fusione (FR-ITER), possono essere utilizzate anche per gli altri tipi di componenti di installazioni nucleari e sono il risultato dell'unione delle RCC-MX, inizialmente sviluppate nell'ambito del progetto per il reattore di ricerca Jules Horowitz, e delle RCC-MR, sviluppate invece per i reattori veloci a sodio.

1.1 Scopo e struttura delle norme RCC-MRx

L'applicazione delle RCC-MRx è limitata ai componenti meccanici:

- considerati come importanti per la sicurezza nucleare e l'operabilità dell' impianto
- che giocano un ruolo principale nell'assicurare la tenuta, l'isolamento, funzioni di sicurezza e supporto

¹si fa riferimento in questa trattazione alla versione *Draft 2010* delle Afcen RCC-MRx

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 8/99
--	---	------------------	----------------------	------------------------

- che contengono fluidi, come pompe, valvole, tubazioni, soffietti, scambiatori di calore

L'uso delle RCC-MRx è basato sulla assegnazione di 6 *Entrance Keys* ad ogni componente, in modo che sia possibile determinare quali norme devono essere applicate:

- **Key 1** indica se il componente considerato fa parte del reattore e dei suoi ausiliari oppure è un *irradiation device*
- **Key 2** indica la classe del componente: $N1_{Rx}$, $N2_{Rx}$ o $N3_{Rx}$ ²
- **Key 3** indica il tipo di componente considerato: vessel, pompa, valvola ecc.
- **Key 4** indica, per gli *irradiation devices*, componenti in classe 3, se sono componenti da catalogo o meno
- **Key 5** indica se il componente è soggetto alla normativa francese per i componenti in pressione
- **Key 6** indica l'insieme delle norme applicabili con riferimento alle *entrance keys* 2 e 3

Sono divise in 3 sezioni:

- **Sezione I:** Disposizioni Generali relative all'intero codice
- **Sezione II:** Requisiti addizionali relativi all'utilizzo di diverse normative applicabili ai componenti di Classe $N3_{Rx}$, e Indicazioni Speciali per i componenti soggetti alle normative specifiche per i componenti in pressione
- **Sezione III** Norme e procedure applicabili. Questa parte è divisa in cinque *Tomi*, ed il *Tomo 1* è suddiviso in ulteriori *Sottosezioni* mentre quelli dal 2 al 5 contengono le norme corrispondenti alle diverse aree tecniche:

²Le tre classi corrispondono a livelli decrescenti di richiesta di sicurezza. Ai componenti in Classe di Sicurezza 1, viene assegnata la classe $N1_{Rx}$, ai componenti in Classe di Sicurezza 2 la classe $N2_{Rx}$ mentre ai componenti in Classe di Sicurezza 3 la classe $N3_{Rx}$.

- **Tomo 1.** Contiene le norme per il progetto e la costruzione. È diviso in sottosezioni:
 - * *Sottosezione A:* Disposizioni Generali per la Sezione III
 - * *Sottosezione B:* Componenti del reattore nucleare e dei suoi ausiliari in classe $N1_{Rx}$
 - * *Sottosezione C:* Componenti del reattore nucleare e dei suoi ausiliari in classe $N2_{Rx}$
 - * *Sottosezione D:* Componenti del reattore nucleare e dei suoi ausiliari in classe $N3_{Rx}$
 - * *Sottosezione K:* Meccanismi di analisi, maneggiamento o movimentazione, in tutte le classi di sicurezza
 - * *Sottosezione L:* Componenti degli *irradiation devices*, in tutte le classi di sicurezza
 - * *Sottosezione Z:* Appendici tecniche
- *Tomo 2:* Specifiche di approvvigionamento di parti e prodotti
- *Tomo 3:* Metodi di analisi distruttivi e non-distruttivi
- *Tomo 4:* Limiti per le operazioni di saldatura, procedure di saldatura e loro applicazioni
- *Tomo 5:* Operazioni di manifattura diverse dalla saldatura

Le **RCC-MRx Design and Construction Code** costituiscono un singolo documento che copre in maniera consistente il progetto e la costruzione dei componenti del reattore e dei suoi ausiliari, dei sistemi di misura, movimentazione e maneggiamento e degli *irradiation devices*. Le tre classi proposte ($N1_{Rx}, N2_{Rx}, N3_{Rx}$) corrispondono a livelli decrescenti di richiesta di sicurezza nella capacità di sostenere differenti tipi di danneggiamento meccanico a cui il componente può essere soggetto come risultato delle specifiche condizioni di funzionamento. Le norme considerano la resistenza meccanica di strutture vicine a sorgenti neutroniche e che possono, a seconda della situazione, operare anche in presenza di fenomeni non trascurabili di *creep*. Le norme di calcolo per la classe $N2_{Rx}$ sono molto vicine, in termini numerici e di forma, a quelle per la classe $N1_{Rx}$ e nel corpo del codice vengono

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 10/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

quindi riportate le differenze relative tra le due classi. Allo stesso modo, per quanto riguarda la progettazione dei componenti per irraggiamento, vengono riportate solamente le differenze con le classi $N1_{Rx}, N2_{Rx}$ e $N3_{Rx}$. Secondo la normativa francese, i *componenti in pressione* (ESP) ed i *componenti nucleari in pressione* (ESPN) sono classificati secondo due criteri:

1. sulla base della pressione, per tipo di componente, per stato fisico del fluido e per tipo di fluido (esplosivo oppure non esplosivo)
2. sulla base delle quantità di radiazioni rilasciata in caso di loro fallimento (solo per i ESPN)

Per i componenti soggetti alla normativa sui componenti in pressione (ESP/ESPN), tutte le norme e i requisiti minimi riportati nelle RCC-MRx sono funzione sia delle classi RCC-MRx ($N1_{Rx}, N2_{Rx}$ e $N3_{Rx}$) sia dei livelli ESPN ($N1_{ESPN}, N2_{ESPN}$ e $N3_{ESPN}$).

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 11/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

Capitolo 2

Sezione I : Disposizioni Generali RDG

All'interno della Sezione I sono riportate le disposizioni generali del corpo normativo. È divisa in 4 sottosezioni più una parte introduttiva.

2.1 Disposizione generali RDG 2000

- *Definizioni.* In questa parte vengono riportate le definizioni che poi verranno richiamate nel documento. Se ne fornisce qui di seguito un elenco. Fasi della vita di un'installazione nucleare
Organizzazioni ed individui coinvolti. Vengono definite in questa parte le figure di:

1. Contraente Generale e Operatore

Il contraente generale è l'entità individuale o legale che decide il progetto e la costruzione dell'installazione nucleare, mentre l'operatore è l'entità individuale o legale che viene autorizzata a costruire l'installazione nucleare;

2. Contraente

Entità individuale o legale responsabile del progetto generale e del monitoraggio della costruzione;

3. Fabbrikante

Entità individuale o legale responsabile del progetto e della costruzione di una parte o di tutta l'installazione nucleare;

4. Sub-Contrainte

Entità individuale o legale responsabile per la costruzione in fabbrica o in sito, a nome del Fabbrikante, di un componente o di parte di un componente dell'installazione nucleare;

5. Fornitore

Entità individuale o legale responsabile della fabbricazione di parti o materiali a nome del fabbricante o di un sub-contrainte;

6. Cliente

7. Ispettore

Persona responsabile del controllo della osservanza dei documenti allegati all'ordine ricevuto dal fornitore;

8. Agente di Sorveglianza

Persona non subordinata al fornitore che si assicura che il componente sia costruito ed ispezionato in accordo con la normativa fornita in allegato all'ordine.

- *Responsabilità*

Il Contraente generale è responsabile per la sicurezza dell'installazione su cui ha controllo. I requisiti di qualità sono riportati nella commessa.

Il fornitore è responsabile per:

- la corrispondenza ai requisiti richiesti nella commessa
- l'applicazione delle disposizioni di regolamentazione

- *Campo di applicazione delle RCC-MRx*

Il codice fornisce le regole tecniche che devono essere applicate per il progetto e la costruzione dei componenti meccanici di un'installazione nucleare e si applica solo a quei componenti che:

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 13/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- sono importanti dal punto di vista della sicurezza e della disponibilità dell'impianto
- hanno funzione di tenuta, separazione fisica o contenimento
- sono classificati come: *vessels*, pompe, valvole, tubazioni, *bellows*, scambiatori di calore e strutture di supporto

- *Requisiti definiti nell'ordine d'acquisto*

Le norme RCC-MRx ed i documenti allegati alla commessa, rappresentano dei requisiti di qualità per il progetto, le forniture, le saldature, i *tests* e la costruzione.

- *Non conformità ai requisiti applicabili*

Ci sono due tipi di non conformità che possono essere distinte:

1. Non conformità rispetto a requisiti propri del fabbricante e che non sono specificate né nelle RCC-MRx né nei documenti allegati alla commessa;
2. Non conformità rispetto ai requisiti delle RCC-MRx o rispetto ai requisiti dei documenti allegati alla commessa.

2.2 Documenti da produrre RDG 3000

Le RDG 3000 definiscono i documenti che devono essere preparati per l'applicazione dei requisiti del codice. I documenti sono archiviati dal Contraente generale o dall'Operatore per un tempo che dipende dal tipo di documento, al fine di soddisfare i requisiti legali e conservare le conoscenze per migliorare il progetto e la conduzione dell'installazione.

- *Equipment Specification*

L' *Equipment Specification* è il documento utilizzato dal Contraente generale per specificare i requisiti tecnici e di garanzia di qualità al sub-contraente. In particolare fornisce i campi di applicazione dell'installazione, i campi di applicazione delle forniture e i documenti di riferimento insieme ad eventuali condizioni di applicabilità delle norme.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 14/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- *Documenti tecnici generali*

Layout globale e documenti di riferimento.

- ◇ determinano le caratteristiche geometriche
- ◇ forniscono una descrizione globale delle interconnessioni tra le parti, dal punto di vista operativo e dal punto di vista della fabbricazione e dell'assemblaggio

Il layout globale ed i disegni di riferimento, che devono comprendere, planimetrie, bozze, disegni, diagrammi e schede tecniche, devono essere autonomamente comprensibili o fare riferimento a documenti più dettagliati. Devono inoltre specificare:

- ◇ il numero identificativo di ogni componente
- ◇ le dimensioni principali e le tolleranze
- ◇ gli altri parametri rilevanti, come le tolleranze funzionali

Lista dei componenti. Per ogni componente riporta:

- ◇ una sua descrizione
- ◇ i riferimenti al layout globale e ai documenti di riferimento
- ◇ le caratteristiche o il riferimento ai documenti che le riportano

Descrizione dei fornitori per la fabbricazione. La descrizione deve riguardare le forniture utilizzate per la fabbricazione ed i metodi di produzione.

- *Rapporti di non conformità*

Forniscono una descrizione scritta del tipo e dell'estensione della non conformità, nonché delle soluzioni adottate per permettere l'utilizzo del componente. Devono fornire almeno le seguenti informazioni:

- ◇ identificazione dei componenti coinvolti e loro descrizione
- ◇ descrizione delle non conformità e confronto con i criteri specifici
- ◇ soluzioni adottate dal fabbricante

◇ azioni correttive ipotizzate

- *Rapporti tecnici di Follow-Up e di fine lavori*

Documenti di Follow-Up. Per tutte le attività di progetto, costruzione, assemblaggio e test deve essere possibile dimostrare che i livelli di qualità sono stati chiaramente definiti, che queste attività sono state eseguite in modo soddisfacente e che sono stati raggiunti i livelli di qualità richiesti. I documenti sono ottenuti attraverso tre fasi successive:

◇ **Iniziale**

◇ **Produzione**

◇ **Finale**

Certificato di conformità. La finalità di questo documento è quella di certificare che tutte le forniture siano conformi ai requisiti tecnici e di qualità stipulati con la commessa.

Rapporto di fine progetto e di costruzione. Questo rapporto contiene un certo numero di documenti che dimostrano che la qualità finale del componente corrisponde alla qualità richiesta.

2.3 Entrance Keys per le RCC-MRx RDG 4000

- **KEY 1.** Il tipo di componente può appartenere a uno di questi tre gruppi
 - componente del reattore nucleare o dei suoi ausiliari
 - componente per le analisi, per il maneggiamento o per la movimentazione
 - componente di un *irradiation device*
- **KEY 2.** Fornisce la classe del componente secondo le RCC-MRx. Per i componenti di sicurezza la relazione tra *classe di sicurezza* e clas-

se *RCC-MRx* deve essere definita prima dell'applicazione delle norme. Nell'eventualità che due componenti interconnessi siano soggetti a diverse classi, si applica all'insieme la classe più restrittiva.

- Classe $N1_{Rx}$
- Classe $N2_{Rx}$
- Classe $N3_{Rx}$

- **KEY 3.** Indica il tipo di componente specifico a cui ci si riferisce
 - vessels, serbatoi o contenitori
 - pompe
 - valvole
 - tubazioni
 - *bellows*
 - strutture
 - scambiatori di calore
- **KEY 4.** Indica, per i componenti degli *irradiation devices* e per i componenti del reattore, se questi siano o meno *componenti da catalogo*
- **KEY 5.** Indica se il componente è soggetto o meno alla normativa per i componenti in pressione.
- **KEY 6.** Sulla base delle *Keys 2 e 3* indica tutte le norme RCC-MRx applicabili tra le seguenti:
 - Sezione III
 - Sezione II REC 2200 come parte dello standard applicativo delle NF EN 13445 ¹
 - Sezione II REC 2300 come parte dello standard applicativo delle NF EN 13480 ²

¹Normativa suoi recipienti in pressione

²Normativa sulle tubazioni industriali metalliche

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 17/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- Sezione II REC 2400 come parte dello standard applicativo delle NF EN 1993-1-1 ³

Mentre sulla base della *Key 5*

- Sezione II REC 3200, se il componente è soggetto o meno alla normativa per i componenti in pressione

2.4 Sistema di gestione RDG 5000

Questa parte fornisce uno schema su come impostare la gestione delle fasi di pianificazione, progetto e fabbricazione.

- *Scopo della gestione.*
- *Responsabilità della gestione*
- *Gestione delle risorse*
- *Implementazione del processo*
- *Misure, limitazioni e miglioramenti*

³Normativa sul calcolo delle strutture in acciaio

Capitolo 3

Sezione II: Requisiti aggizionali e provvedimenti speciali REC

La Sezione II include i requisiti aggizionali per l'applicazione delle norme RCC-MRx e alcune istruzioni speciali applicabili a componenti soggetti a particolare regolamentazione. Questa Sezione è divisa in tre parti principali:

- **REC 1000**, contenente l'introduzione alla Sezione e la Lista degli Standards che vengono poi esaminati
- **REC 2000**, contenente i requisiti aggizionali per l'utilizzo degli Standards NF EF 13445 (REC 2200) e NF EN 13480 (REC 2300)
- **REC 3000**, contenente tutte le istruzioni speciali applicabili ai componenti che abbiano una particolare regolamentazione

3.1 Requisiti aggizionali per l'utilizzo degli standards europei REC 2000

In questa sottosezione vengono definiti i metodi di utilizzo degli standard:

- *NF EN 13445* Unfired pressure vessels
- *NF EN 13480* Metallic industrial piping

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 19/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- *NF EN 1993-1-1: Eurocode 3 Design of steel structure Part 1-1* General rules and rules for buildings

3.2 Istruzioni speciali per componenti soggetti a diversa regolamentazione REC 3000

In questa sottosezione vengono fornite tutte le informazioni aggiuntive e le istruzioni speciali necessarie a verificare tutti i requisiti del codice per quei componenti che sono soggetti a normative particolari. Le REC 3000 non si sostituiscono alle normative in questione ma provvedono a fornire maggiori informazioni e a sottolineare particolari aspetti. I componenti che ricadono in questa sottosezione sono quelli per cui sono valide le normative ESP¹ ed ESPN².

¹Normativa francese, anno 1999, riguardante i componenti in pressione. Si applica al progetto, alla fabbricazione e alla valutazione di conformità di tutti i componenti o assemblati che abbiano una pressione massima ammissibile superiore a 1.5 bar (assoluti)

²Normativa francese, anno 2005, riguardante i componenti nucleari in pressione. Con riferimento ai componenti descritti nella ESP, vengono considerati nucleari quelli che o assicurano il contenimento di sostanze radioattive o il cui fallimento porti ad un rilascio di attività superiore ai 370 MBq

Capitolo 4

Sezione III: Norme per i componenti meccanici di installazioni nucleari

Questa sezione è composta da cinque tomi contenenti le norme per il progetto, la costruzione e la verifica di componenti meccanici per installazioni nucleari:

- **Tomo 1:** Norme per il progetto e la fabbricazione
- **Tomo 2:** Specifiche di approvvigionamento di parti e prodotti
- **Tomo 3:** Metodi di analisi distruttivi e non-distruttivi
- **Tomo 4:** Limiti per le operazioni di saldatura, procedure di saldatura e loro applicazioni
- **Tomo 5:** Operazioni di manifattura diverse dalla saldatura

4.1 Tomo 1: Norme per il progetto e la costruzione

Il *Tomo 1* contiene le norme per il progetto e la costruzione ed è articolato in sottosezioni ordinate in ordine alfabetico:

- Sottosezione A: Descrizione generale della Sezione III
- Sottosezione B: Norme per componenti in classe $N1_{Rx}$
- Sottosezione C: Norme per componenti in classe $N2_{Rx}$
- Sottosezione D: Norme per componenti in classe $N3_{Rx}$
- Sottosezione K: Meccanismi di analisi e movimentazione
- Sottosezione L: *Irradiation devices*
- Sottosezione Z: Appendici tecniche

Le sottosezioni B,C,D,K ed L hanno la stessa struttura di base, che si riporta di seguito.

4.1.1 Capitolo 1000: Introduzione

È diviso in 3 parti:

- 1100 Introduzione, dove viene definito come considerare i rapporti reciproci tra componenti, i limiti tra due componenti connessi ed i collegamenti tra componenti nelle strutture
- 1200 Documenti Richiesti, dove è riportata una lista dei documenti da produrre
- 1300 Identificazione, dove viene definito il sistema di identificazione dei componenti in fase di fabbricazione in modo da poterli collegare alla documentazione allegata in modo veloce. Il sistema di identificazione è adottato anche per la fase di controllo e verifica dei componenti.

4.1.2 Capitolo 2000: Materiali utilizzabili per la costruzione dei componenti

È diviso in 5 parti:

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 22/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- 2100 Generale, all'interno della quale viene definita la modalità di richiesta di inserimento di un nuovo materiale
- 2200 Provvedimenti per l'approvvigionamento, dove vengono definiti i riferimenti alle norme, specifiche del Tomo 2, che devono essere applicate per le forniture dei materiali
- 2300 Resistenza alla corrosione, dove viene riportata una suddivisione degli acciai inossidabili in base alla resistenza alla corrosione intergranulare e al contenuto di carbonio o materiali di lega. Le specifiche dei materiali sono poi riportate nelle appendici tecniche
- 2400 Contenuto residuo di Cobalto, dove acciai e leghe sono classificati in base alla *Classe di purezza di Cobalto* in modo che il contenuto residuo sia compatibile con le specifiche del Tomo 2
- 2500 Istruzioni per l'uso degli standards

4.1.3 Capitolo 3000: Norme per il progetto

Le regole contenute all'interno di questo capitolo riguardano il progetto e l'analisi strutturale di componenti e supporti. Scopo delle regole è quello di assicurare il rispetto dei margini di sicurezza relativamente ai tipi di danneggiamento meccanico che potrebbero avvenire come risultato di specifiche combinazioni di carico in condizioni operative. In questo capitolo non vengono trattate le misure atte a prevenire i danni risultanti da fenomeni di erosione o corrosione. È Diviso in 9 parti:

3100 Regole generali di progetto.

3110 Finalità e limiti delle norme

3120 Tipi di danneggiamento

- Danneggiamento di TIPO P. È quel tipo di danneggiamento derivante dall'applicazione alle strutture di carichi monotoni crescenti o costanti:
 - Eccessiva deformazione

- Instabilità in campo plastico
- Deformazione plastica a lungo termine
- Instabilità in campo plastico a lungo termine
- Time-dependent fracture
- Instabilità elastica o elasto-plastica
- Danneggiamento di TIPO S. È quel tipo di danneggiamento derivante dall'applicazione ciclica di carichi:
 - Deformazione Progressiva
 - Fatica
 - Buckling
 - Rottura di schianto

3130 Condizioni operative

Durante il funzionamento i componenti possono essere soggetti a diverse condizioni operative, che sono raggruppate in quattro categorie, dipendenti dalla frequenza di accadimento.

- I categoria: Normali Operazioni
- II categoria: Malfunzionamenti operazionali, Start-Up, Shut-down
- III categoria: Condizione di emergenza corrispondente a possibilità di accadimento molto bassa
- IV categoria: Condizione di estrema improbabilità

3140 Considerazioni sui carichi.

I carichi che vengono considerati sono, in generale:

- a. pressioni interne ed esterne
- b. peso dei componenti e del contenuto, in condizioni statiche e dinamiche
- c. le forze generate da condizioni e componenti esterni al sistema considerato e che agiscono come condizioni al contorno
- d. carichi risultanti da terremoti e vibrazioni
- e. reazioni vincolari

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 24/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

f. effetti della temperatura, siano essi costanti o variabili

g. sollecitazioni risultanti dall'irraggiamento

3150 Livelli di sollecitazione da rispettare.

Questi criteri sono stati stabiliti per ridurre al minimo la possibilità di danneggiamento delle strutture:

- *Livello A*: lo scopo è proteggere il componente contro i seguenti tipi di danneggiamento:
 - Eccessiva deformazione
 - Instabilità in campo plastico
 - Time-dependent fracture
 - Instabilità in campo elastico o elestoplastico
 - Deformazione progressiva
 - Fatica
- *Livello C*: lo scopo è proteggere il componente contro i seguenti tipi di danneggiamento:
 - Eccessiva deformazione
 - Instabilità in campo plastico
 - Time-dependent fracture
 - Instabilità in campo elastico o elestoplastico
- *Livello D*: lo scopo è proteggere il componente contro i seguenti tipi di danneggiamento:
 - Instabilità in campo plastico
 - Time-dependent fracture
 - Instabilità in campo elastico o elestoplastico

3160 Livelli minimi da rispettare

- *Condizione Operativa di categoria I e II*. È necessario rispettare il livello A
- *Condizione Operativa di categoria III*. È necessario rispettare almeno il livello C

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 25/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- *Condizione Operativa di categoria IV.* È necessario rispettare almeno il livello D

3170 Equipment Specification

Vengono definite in questa parte le specifiche per la stesura del documento *Equipment Specification*

3180 Relazione di progetto

In questa parte viene fornita la tipica organizzazione che deve avere la relazione di progetto che il fabbricante deve fornire per ogni componente.

3190 Considerazioni speciali

- *Corrosione, erosione, corrosione-erosione.*
Se il componente è soggetto ad assottigliamento è necessario prevedere ad uno spessore addizionale. È inoltre richiesta la verifica dei criteri sul danneggiamento e del corretto funzionamento sia in condizione originale sia con la progressiva diminuzione di spessore.
- *Appendici.*
Deve essere verificato il comportamento in condizioni operative di ogni possibile penetrazione, bocchello, sostegno che viene saldato o collegato in altro modo al componente. È richiesta anche l'analisi a fatica.
- *Variazione delle proprietà meccaniche nelle zone di giunzione.*
Particolare attenzione deve essere posta nel progetto, nell'analisi, nella fabbricazione e nel controllo delle giunzioni per poter considerare al meglio le discontinuità tra materiali e componenti diversi.
- *Marcatura.*
È proibita la marcatura profonda di componenti sottoposti a carichi pesanti.
- *Requisiti di pulizia nucleare.*
Il progetto e la fabbricazione devono garantire una geometria

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 26/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

che renda agevole la pulizia del componente e non permetta l'accumulo di prodotti di corrosione. Deve essere inoltre permessa l'ispezione visiva dei componenti.

- *Provvedimenti legati all'invecchiamento termico.*

Con riferimento all'appendice 3 è necessario progettare il componente tenendo conto della possibile degradazione delle caratteristiche meccaniche dovuta alla temperatura di esercizio.

- *Provvedimenti legati all'irraggiamento.*

È necessario inoltre prevedere le conseguenze dell'irraggiamento sulle proprietà meccaniche del componente, con riferimento alle Appendici 3.

3200 Design by Analysis

Lo scopo delle analisi meccaniche è quello di dimostrare che il componente non sia soggetto ad una certa tipologia di danneggiamento quando è sottoposto ai carichi associati alle varie condizioni operative. Le analisi consistono nella verifica del rispetto dei criteri selezionati sulla base del tipo di danneggiamento. Di seguito è riportata la struttura della parte 3200 e successivamente, nel Cap. 5, viene riportata l'analisi dettagliata per i componenti in classe $N1_{Rx}$.

3210 Introduzione Generale

Metodi di analisi

Criteri applicabili

3220 Terminologia legata all'analisi strutturale

Discontinuità geometriche

Ciclaggi

Comportamento strutturale

Sollecitazioni

Elastic Follow-Up

Usage fraction

Sforzi

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 27/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

Carico collassato

Integrale J

3240 Metodi di analisi

Analisi Elastica

Analisi Elasto-plastica di una struttura soggetta ad un carico lineare monotono

Analisi Elasto-plastica di una struttura soggetta ad un carico ciclico

Analisi Elasto-visco-plastica di una struttura soggetta ad un carico ciclico

3250 Criteri per la prevenzione di danneggiamenti di Tipo P

Creep trascurabile

Creep significativo

3260 Criteri per la prevenzione di danneggiamenti di Tipo S

Creep trascurabile

Creep significativo

Linee guida per la definizione di carichi ciclici

3270 Criteri per il Buckling

Creep trascurabile

Creep significativo

3280 Criteri per bulloni e parti imbullonate

Danneggiamento di Tipo P

Assemblaggi bullonati pre-caricati che mantengono la tenuta

Assemblaggi bullonati pre-caricati che non mantengono la tenuta

Danneggiamento di Tipo S

Assemblaggi bullonati pre-caricati che mantengono la tenuta

Assemblaggi bullonati pre-caricati che non mantengono la tenuta

Assemblaggi bullonati non pre-caricati

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 28/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

3290 Considerazioni sui giunti saldati

Criteri per la prevenzione di danneggiamenti di Tipo P

Criteri per la prevenzione di danneggiamenti di Tipo S

Determinazione delle sollecitazioni nelle saldature

3300 Regole per il progetto di vessels

3400 Regole per il progetto di pompe

3500 Regole per il progetto di valvole

3600 Regole per il progetto di tubazioni

3700 Regole per il progetto di bellows

3800 Regole per il progetto di strutture di contenimento

3900 Regole per il progetto di scambiatori di calore

4.1.4 Capitolo 4000: Norme per la fabbricazione e le verifiche

Il capitolo 4000 tratta le operazioni di fabbricazione e verifica, dal materiale grezzo all'assemblaggio del componente, sia in sito sia in fabbrica. Insieme ai Tomi 2,3,4 e 5 e alla sottosezione A, riporta i documenti necessari alle procedure di fabbricazione, di utilizzo e di qualificazione dei prodotti. Definisce inoltre, cronologicamente, le varie verifiche di conformità, i *test* da effettuare, i metodi da utilizzare, l'estensione dell'area da analizzare, il momento in cui eseguire i *test* ed i criteri di accettabilità dei risultati.

Il capitolo è strutturato in quattro macro-sezioni, e contiene i riferimenti ai tomi specifici sia per quanto riguarda i materiali sia per quanto riguarda le operazioni di saldatura ed assemblaggio. Nel tomo 1, a seconda della sottosezione, e quindi della classe del componente, sono presenti i limiti particolari. Per la trattazione generale il testo rimanda ai tomi o alle sottosezioni specifici. Di seguito si riporta la struttura del capitolo.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 29/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

4100 Introduzione generale

4200 Requisiti e documenti preliminari

4210 Documenti

4220 Approvvigionamento di parti e materiali

4230 Qualificazione

4240 Aree di lavoro

4300 Operazioni di fabbricazione

4310 Generale

4320 Marcatura

4330 Taglio - Riparazione senza saldatura

4340 Allineamento ed assemblaggio

4350 Trattamenti superficiali

4360 Pulizia

4370 Assemblaggio meccanico - Assemblaggio per brasatura

4380 Trattamenti termici

4400 Saldature e tecniche associate

4410 Generale

4420 Stoccaggio e utilizzo dei prodotti per la saldatura

4430 Preparazione e controllo dei bordi e delle superfici per la saldatura

4440 Saldatura di componenti saldati

4450 Riparazione per saldatura

4460 Analisi non distruttive sulle saldature

4470 Cedole di saldatura e analisi distruttive

4480 Analisi chimiche dei rivestimenti

4490 Materiali di riporto

4.1.5 Capitolo 5000: Test

Il capitolo 5000 riporta l'elenco e le possibili modifiche ai test di pompe e valvole definiti in altre normative di riferimento. Con riferimento a queste normative specifiche (NF EN ISO) vengono definiti coefficienti e tempi applicabili. Di seguito si riporta la struttura del capitolo.

5100 Introduzione generale

5400 Verifica delle pompe

5410 Generale

5420 Tests di accettabilità delle pompe

5430 Tests di qualificazione sismica delle pompe

5500 Verifica delle valvole

5510 Generale

5520 Tests di accettabilità delle valvole

5530 Tests di qualificazione sismica delle valvole

4.2 Tomo 2: Materiali

Il Tomo 2 è organizzato come segue:

- RM 010-0, contenente le comuni prescrizioni generali per l'approvvigionamento dei materiali metallici
- RM 030-0, contenente le prescrizioni per l'approvvigionamento dei materiali metallici come definite dagli *standard* di riferimento
- RM 100-0 fino a RM 900-0, contenente un set di *Reference Procurement Specifications (RPS)* per i materiali metallici

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 31/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

4.3 Tomo 3: Metodi di analisi distruttivi e non distruttivi

Questo Tomo è diviso in 8 parti, ciascuna riguardante una diversa tipologia di analisi.

1. Esami Meccanici, Fisici, Fisico-Chimici e Chimici

- Prove di trazione
- Prove di resilienza
- Prove di resistenza alla frattura fragile
- Prove di flessione
- Prove di riscaldamento
- Prove di appiattimento
- Prove di durezza
- Prove di creep
- Prova di corrosione intergranulare accelerata
- Prove di corrosione delle leghe di Alluminio
- Prove di corrosione delle leghe di Zirconio
- Esame delle strutture metalliche
- Contenuto di inclusioni e grandezza dei grani
- Contenuto di *Ferrite*
- Analisi chimica
- Valutazione delle sollecitazioni residue per gli acciai inossidabili austenitici per tubi di scambiatori di calore

2. Esami con ultrasuoni

- Analisi per pezzi stampati
- Analisi per pezzi forgiati

- Analisi per piastre
- Analisi per tubi
- Analisi delle salature
- Analisi di rivestimenti, protezioni e guaine
- Analisi dei *liner*

3. Esami radiografici

- Analisi radiografica dei pezzi stampati
- Analisi radiografica delle saldature

4. Esami con liquidi penetranti

5. Magnetoscopia

- Analisi con flussi di corrente e strumentazione a mano
- Analisi con flussi magnetici

6. Esame delle correnti parassite per prodotti tubolari

7. Altri metodi di analisi

- Esame visivo
- Determinazione delle condizioni di superficie
- Condizioni per il test di impermeabilità

8. Qualificazione e certificazione del personale per le analisi non distruttive

4.4 Tomo 4: Saldature

Il Tomo 4 fornisce le regole riguardanti le operazioni di saldatura e la loro implementazione:

- RS 2000 *Test* di accettabilità di numerosi materiali di apporto
- RS 3000 Qualificazione delle procedure di saldatura

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 33/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- RS 4000 Qualificazione dei saldatori e degli operatori per le procedure di saldatura
- RS 5000 Qualificazione dei materiali di apporto
- RS 6000 Qualificazione dell'officina
- RS 7000 Operazioni di saldatura portate avanti nella costruzione del componente:
 - Immagazzinamento ed utilizzo dei materiali di saldatura
 - Esecuzione delle saldature
 - Trattamenti termici legati alla saldatura
 - Riparazioni con saldatura
 - Esami non distruttivi sulle saldature
 - Esami distruttivi sulle saldature
- RS 8000 Procedure di saldatura di rivestimenti
 - Accettabilità del materiale di apporto
 - Procedura di qualificazione del rivestimento
 - Qualificazione delle saldatura e dei saldatori
 - Manifattura
- RS 9000 *Test* ed analisi distruttivi delle saldature

4.5 Tomo 5: Manifattura

Il Tomo 5 parte dalla considerazione secondo la quale è impossibile definire delle regole per la fabbricazione e la produzione che siano sufficientemente dettagliate da assicurare dei risultati soddisfacenti. Vengono perciò indicati come requisiti base dalle RCC-MRx il *Know-How* e i mezzi. Successivamente all'interno del Tomo sono riportati i requisiti minimi che devono essere

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 34/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

soddisfatti, tuttavia viene detto che il fabbricante può applicare tutti gli accorgimenti addizionali che possano assicurare la qualità del prodotto. Viene precisato tuttavia che devono essere rispettati tutti i requisiti addizionali e le tolleranze riportate all'interno dell'*Equipment Specification*.

Capitolo 5

Metodi di analisi della Deformazione Progressiva. L'Efficiency Diagram

In questo capitolo si riportano i metodi di analisi, definiti nelle RCC-MRx, atti a prevenire danneggiamenti di tipo S dovuti agli effetti del ratcheting¹.

5.1 Introduzione Generale

Lo scopo dell'analisi strutturale meccanica è quello di dimostrare che il componente, sottoposto ai carichi tipici delle condizioni operative in cui si trova, non sia soggetto a certi tipi di danneggiamento, quali quelli di tipo S dovuti a carichi ciclici.

5.1.1 Metodi di analisi

I metodi di analisi possibili sono tre:

- *Analisi elastica*, in cui si assume che il comportamento del materiale sia appunto elastico, che gli spostamenti siano piccoli (linearità geometrica) e che non ci siano sollecitazioni iniziali o residue;

¹Fenomeno per cui, sotto l'effetto di un carico ciclico, ad ogni ciclo si presenta un aumento della deformazione.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 36/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- *Analisi sperimentale*, basata sull'utilizzo di modelli rappresentanti il componente con cui si possano ricavare deformazioni e sforzi con riferimento al danneggiamento in esame;
- *Analisi inelastica*, che rappresenta tutti i tipi di analisi diversi da elastica e sperimentale.

Nel caso in cui si rendano necessari due tipi distinti di analisi bisogna dimostrare la coerenza dei due metodi ai confini della parte esaminata.

5.1.2 Criteri applicabili

Le regole da rispettare differiscono in funzione di:

- Criterio: Livello A C o D
- Metodo di analisi: elastica, inelastica, sperimentale
- Tipo di danneggiamento: tipo P o tipo S

Queste regole dipendono inoltre da tre fattori fondamentali che giustificano o meno l'adozione successiva di semplificazioni:

- **Temperatura**, da cui dipendono strettamente le proprietà del materiale;
- **Tempo**, che influenza il comportamento dei materiali in modo significativamente crescente con l'aumento della temperatura (creep);
- **Irraggiamento**, poiché i neutroni possono indurre movimento di atomi e trasmutazioni, con conseguente modifica della struttura microscopica del materiale. Da non sottovalutare è il creep dovuto all'irraggiamento combinato con il creep di natura termica. Ad elevate temperatura, l'irraggiamento porta anche a problemi di swelling, dovuto alla formazione di sacche gassose.

Sotto certe condizioni è possibile trascurare i fenomeni di creep, e quindi trascurare la variabile tempo (Appendice A3.31), oppure trascurare l'irraggiamento (Appendice A3.32). In tabella 5.1 ed in tabella 5.2 si riportano le regole applicabili nelle situazioni di creep trascurabile e significativo.

	Criterio	Irraggiamento trascurabile	Irraggiamento significativo
Danneggiamento Tipo P	Livello A	RB 3251.11	RB 3251.21
	Livello C	RB 3251.12	RB 3251.22
	Livello D	RB 3251.13	RB 3251.23
	Livello D	RB 3252.13	
Danneggiamento Tipo S	Livello A	RB 3261.1	RB 3261.2
Buckling		3271	
Bulloni		3280	

Tabella 5.1: Regole applicabili in caso di Creep trascurabile

	Criterio	Irraggiamento trascurabile	Irraggiamento significativo
Danneggiamento Tipo P	Livello A	RB 3252.11	RB 3252.21
	Livello C	RB 3252.12	
	Livello D	RB 3252.13	
Danneggiamento Tipo S	Livello A	RB 3262.1	RB 3262.2
Buckling		3272	
Bulloni		3280	

Tabella 5.2: Regole applicabili in caso di Creep significativo

5.2 Terminologia legata all'analisi strutturale

5.2.1 Discontinuità geometriche

Discontinuità strutturale totale

Discontinuità geometrica o del materiale che modifica la distribuzione degli sforzi e della deformazione in tutto lo spessore.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 38/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

Discontinuità strutturale locale

Discontinuità geometrica o del materiale che modifica la distribuzione degli sforzi e della deformazione in una porzione limitata dello spessore.

Discontinuità geometrica

Per discontinuità geometrica si intende un'area in cui il raggio di curvatura non può essere chiaramente definito e può raggiungere valori estremamente bassi rendendo impossibile definire gli sforzi in quel punto. Questa definizione copre tutte le aree contenenti un intaglio a spigolo vivo dovuto al progetto o alla fabbricazione.

5.2.2 Ciclaggi

Evoluzione dei carichi

Durante la vita operativa le strutture sono soggette a carichi termici e meccanici che possono periodicamente variare nel tempo e che di conseguenza inducono un danneggiamento da fatica o deformazione progressiva (Tipo S) in presenza o in assenza di fenomeni di creep. Nello *Equipment Specification* è necessario riportare una lista delle condizioni stazionarie e di carico variabile che permette di definire le evoluzioni del carico da cui può dipendere il danneggiamento.

Deformazioni cicliche

Le deformazioni cicliche corrispondono alla variazione nel tempo del tensore delle deformazioni. Il numero di deformazioni può essere determinato in base al numero di carichi ciclici che le causano. Uno stesso tipo di carico può determinare differenti cicli di deformazione. In generale, a causa del creep e della plasticità, queste variazioni possono differire dai modelli.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 39/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

Sforzi ciclici

La stessa definizione può essere applicata agli sforzi ciclici, considerando però il tensore degli sforzi.

5.2.3 Comportamento strutturale

Queste definizioni, tranne quella di deformazione progressiva, sono valide solo in assenza di fenomeni di creep.

Plastic adaptation (shakedown)

Per carichi ciclici, una struttura si dice *plastic adapted* se, dopo pochi cicli, il suo comportamento diventa elastico in ogni punto della struttura.

Plastic accomodation

Per carichi ciclici, una struttura subisce la *plastic accomodation* se, dopo pochi cicli, pur rimanendo elasto-plastico, il suo comportamento è costante ad ogni ciclo. Esclude la possibilità di deformazione progressiva.

Global plastic adaptation (overall shakedown)

È lo stato di una struttura che subisce *plastic accomodation* e nella quale le deformazioni plastiche appaiono solo nella zona di concentrazione delle deformazioni, le cui dimensioni sono minori della lunghezza della linea media della sezione in considerazione. In questa condizione la risposta della struttura è principalmente elastica e lo sviluppo della deformazione plastica è inibito dai vincoli costituiti dalle parti che rimangono elastiche. L'effetto della concentrazione della deformazione dipende principalmente dalla geometria, dal carico e dal materiale.

Progressive deformation (Ratchet)

In assenza di creep e per comportamento puramente plastico o elastico il ratchet è definito come l'aumento della deformazione per ogni ciclo sotto

l'effetto di un carico ciclico. Nelle RCC-MRx la deformazione progressiva è intesa come l'aumento della deformazione dovuta ai carichi generati da deformazioni cicliche.

5.2.4 Sollecitazioni

Breakdown degli sforzi

- *Supporting line segment.* All'esterno delle aree di discontinuità il *segmented line segment* è sovrapposto al segmento perpendicolare alla superficie media della parete Fig.5.1;

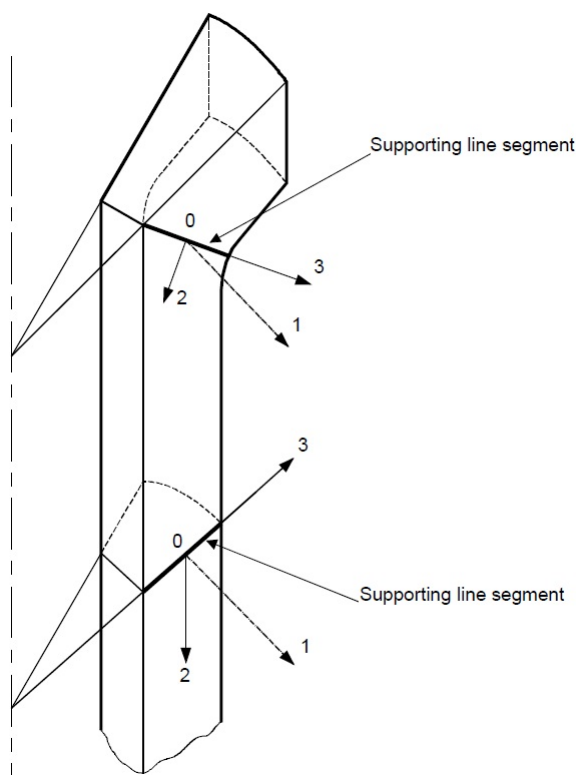


Figura 5.1: Supporting Line Segment

- *Sollecitazione di membrana.* Dato un tensore degli sforzi σ , di componenti σ_{ij} , in un riferimento cartesiano 0123, il tensore delle sollecitazioni di membrana è il tensore le cui componenti $(\sigma_{ij})_m$ sono uguali al valore

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 41/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

medio delle σ_{ij} lungo il *supporting line segment*. Le componenti $(\sigma_{ij})_m$ sono definite dalla 5.1:

$$(\sigma_{ij})_m = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} dx_3 \quad (5.1)$$

- *Sollecitazione di flessione*. Dato un tensore degli sforzi σ , di componenti σ_{ij} , in un riferimento cartesiano 0123, il tensore delle sollecitazioni di flessione è il tensore le cui componenti $(\sigma_{ij})_b$ sono definite dalla 5.2:

$$(\sigma_{ij})_b = \frac{12x_3}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} x_3 dx_3 \quad (5.2)$$

- *Sollecitazione Lineare*. Dato un tensore degli sforzi σ , di componenti σ_{ij} , in un riferimento cartesiano 0123, il tensore delle sollecitazioni lineari è il tensore le cui componenti $(\sigma_{ij})_l$ sono definite dalla 5.3:

$$(\sigma_{ij})_l = (\sigma_{ij})_m + (\sigma_{ij})_b \quad (5.3)$$

- *Sollecitazione Non-Lineare*. Dato un tensore degli sforzi σ , di componenti σ_{ij} , in un riferimento cartesiano 0123, il tensore delle sollecitazioni non lineari è il tensore le cui componenti $(\sigma_{ij})_{nl}$ sono definite dalla 5.4:

$$(\sigma_{ij})_{nl} = \sigma_{ij} - [(\sigma_{ij})_m + (\sigma_{ij})_b] \quad (5.4)$$

- *Sollecitazione del secondo ordine*. Dato un tensore degli sforzi σ , di componenti σ_{ij} , in un riferimento cartesiano 0123, il tensore delle sollecitazioni del secondo ordine è il tensore le cui componenti $(\sigma_{ij})_c$ sono definite dalla 5.5:

$$(\sigma_{ij})_c = \frac{96}{h^4} (|x_3| - \frac{h}{4}) \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{ij} - (\sigma_{ij})_m) x_3^2 dx_3 \quad (5.5)$$

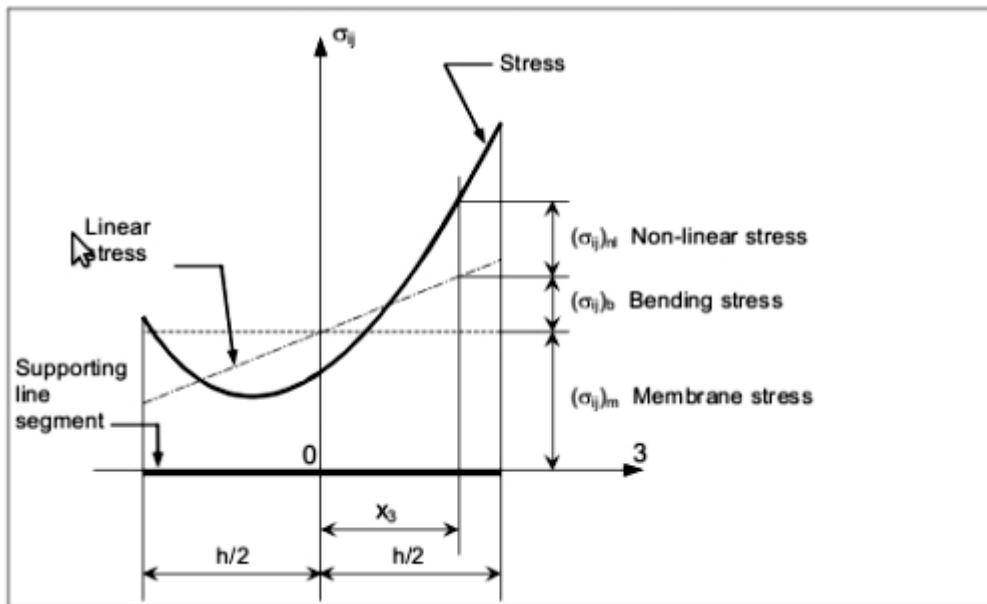


Figura 5.2: Breakdown degli sforzi

Definizione delle sollecitazioni ottenute dall'analisi elastica

- *Sollecitazione totale.* La sollecitazione totale è il valore di sollecitazione ottenuto in un certo punto sotto l'effetto di tutte le forze a cui il componente è soggetto. Questo valore deve essere scomposto in categorie di base per l'applicazione dei criteri;
- *Sollecitazione meccanica.* Si riferisce alle sollecitazioni che risultano dall'applicazione dei carichi meccanici come pressione interna, peso, terremoti e, dove possibile, reazioni vincolari;
- *Sollecitazioni termiche generali e locali per un involucro.* Queste sono sollecitazioni auto-equilibrate derivanti da distribuzioni di temperatura o dalla presenza di differenti coefficienti di espansione;
- *Sollecitazione dovuta agli spostamenti imposti.* Questa sollecitazione deriva dagli spostamenti imposti come ad esempio quelli agli ancoraggi;
- *Sollecitazione dovuta allo swelling sotto irraggiamento.* In condizioni operative, a causa dell'irraggiamento del materiale, possono verificarsi

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 43/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

fenomeni di swelling o aumento di dimensioni in caso di materiale anisotropo. Calcolare le sollecitazioni dovute allo swelling richiede un'analisi strutturale che tenga conto della *legge di irraggiamento* e, eventualmente, della legge che definisce il creep sotto irraggiamento che potrebbe parzialmente controbilanciare le tensioni.

Classificazione delle sollecitazioni ottenute dall'analisi elastica

Come già detto, le regole contenute nella parte RB 3200 richiedono, per la prevenzione del danno da deformazione progressiva, che le sollecitazioni totali siano scomposte in varie categorie di sollecitazione.

- *Sollecitazioni Primarie*. Le sollecitazioni primarie sono definite come la frazione della sollecitazione totale che non scompare dopo una piccola deformazione permanente, e cioè che non causa apprezzabili modificazioni geometriche.

All'interno di una struttura, ogni campo di sollecitazione che bilanci le forze di volume ed i carichi applicati alla superficie è un limite superiore per la sollecitazione primaria.

Quando non c'è rischio di Elastic Follow-Up², le sollecitazioni termiche e quelle dovute agli spostamenti imposti non sono considerate primarie.

Generalmente per sollecitazione primaria viene intesa la parte della sollecitazione totale che deve essere limitata per non portare a danneggiamenti di tipo P;

- *Sollecitazioni Primarie generali di membrana* : P_m . Rappresentano il valore medio del tensore della sollecitazione primaria all'interno dello spessore della parete. Possono essere calcolate attraverso l'utilizzo della 5.1;
- *Sollecitazioni Primarie di flessione* : P_b . È la sollecitazione distribuita linearmente all'interno dello spessore e che genera lo stesso *momento* della sollecitazione primaria. Si può ottenere applicando la 5.2;

²Per maggiori dettagli vedere 5.2.5

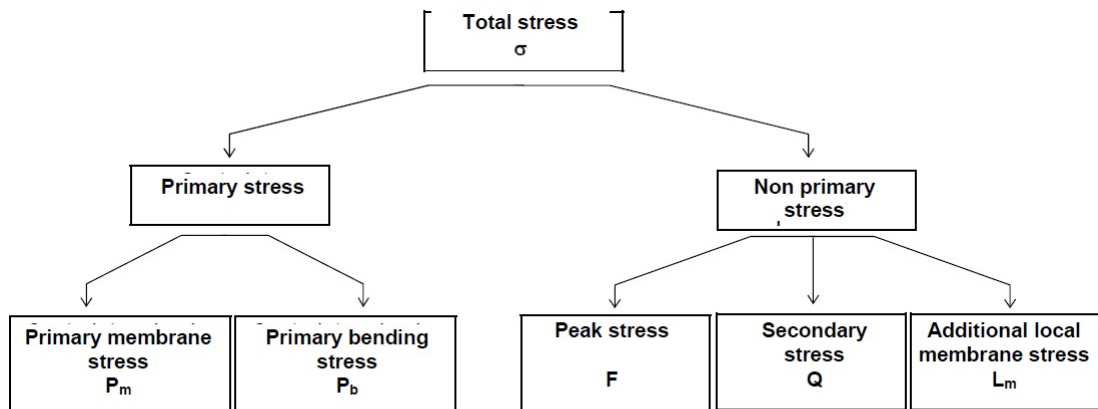
- *Sollecitazioni Primarie locali di membrana* : P_L . Nelle vicinanze di una discontinuità geometrica o di carico, le sollecitazioni meccaniche devono essere distinte dalle sollecitazioni non primarie. Le sollecitazioni di membrana associate alle sollecitazioni meccaniche vengono definite L_m . È possibile allora definire le sollecitazioni locali di membrana come $P_L = P_m + L_m$;
- *Sollecitazioni Secondarie* : Q . Le sollecitazioni secondarie sono la frazione di quelle totali che possono scomparire come risultato di piccole deformazioni. Nel caso in cui non ci sia il rischio di Elastic Follow-Up, le sollecitazioni termiche e quelle dovute agli spostamenti imposti rientrano in questa categoria insieme ad una parte delle sollecitazioni meccaniche. Questa sollecitazione può essere scomposta in sollecitazione di membrana Q_m e sollecitazione di flessione Q_b : $Q = Q_m + Q_b$;
- *Sollecitazioni di picco* : F . Le sollecitazioni di picco possono essere definite come sollecitazioni addizionali applicate per mezzo di una discontinuità geometrica della struttura o per una non linearità nella distribuzione delle sollecitazioni all'interno dello spessore. Generalmente sono molto localizzate e non possono causare deformazione dell'intera struttura. Sono importanti dal punto di vista del comportamento a fatica e, ad alta temperatura, per quanto riguarda i danni localizzati dovuti al creep o al creep combinato con il comportamento a fatica.

Rappresentazione scalare dello stato di sollecitazione

Lo stato di sollecitazione è definito per ogni punto dal tensore σ mentre i limiti imposti sono dati in termini di quantità scalari. È quindi necessario definire delle quantità scalari equivalenti allo stato di sollecitazione e alla sua variazione nel tempo. Si definiscono allora per un dato punto:

- l'intensità della sollecitazione $\bar{\sigma}$
- l'ampiezza della sollecitazione $\overline{\Delta\sigma}$

ottenibili attraverso l'utilizzo di due metodi distinti:



where: $\sigma = P_m + P_b + L_m + Q + F$ or $\sigma = P_L + P_b + Q + F$ where $P_L = P_m + L_m$

Figura 5.3: Classificazione delle sollecitazioni

- *Maximum Shear Method (o Criterio della Tensione Tangenziale Massima - TTM)*
- *Octahedral Shear Method (o Criterio dell'Energia di Distorsione - ED)*

Le due teorie portano a risultati che differiscono in media del 15%, ed in particolare, i valori calcolati attraverso la teoria TTM sono più conservativi di quelli che vengono calcolati attraverso la teoria ED. Di seguito si riportano i metodi di calcolo per le due teorie nel caso di assi cartesiani e sollecitazione triassiale.

Intensità della sollecitazione - Maximum shear theory

Sia σ un tensore di sollecitazioni con componenti cartesiane σ_{ij} , dove i e $j = 1, 2, 3$, e componenti principali uguali a σ_1 , σ_2 e σ_3 . L'intensità della sollecitazione è definita come:

$$\bar{\sigma} = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_3|) \quad (5.6)$$

Intensità della sollecitazione - Octahedral shear theory

Sia σ un tensore di sollecitazioni con componenti cartesiane σ_{ij} , dove i e $j = 1, 2, 3$, e componenti principali uguali a σ_1 , σ_2 e σ_3 . L'intensità della

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 46/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

sollecitazione è definita come:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{1/2[(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2+6(\sigma_{12}^2+\sigma_{23}^2+\sigma_{31}^2)]^{1/2}} \quad (5.7)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{1/2[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}} \quad (5.8)$$

$$\bar{\sigma} = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1]^{1/2} \quad (5.9)$$

Ampiezza della sollecitazione - Maximum shear theory

L'ampiezza della sollecitazione, corrispondente allo scalare della variazione nel tempo del tensore delle sollecitazioni, deve essere determinata nello stesso punto della struttura per tutti i cicli dedotti dall'analisi degli stati stazionari e transitori.

$$\overline{\Delta\sigma} = \max_{(t,t')}[\overline{\sigma(t,t')}] = \max_{(t,t')}[\overline{\sigma(t) - \sigma(t')}] \quad (5.10)$$

Ampiezza della sollecitazione - Octahedral shear theory

L'equazione per il calcolo dell'ampiezza della sollecitazione è la stessa.

$$\overline{\Delta\sigma} = \max_{(t,t')}[\overline{\sigma(t,t')}] = \max_{(t,t')}[\overline{\sigma(t) - \sigma(t')}] \quad (5.11)$$

Sollecitazioni equivalenti ed ampiezza della sollecitazione equivalente

Le sollecitazioni equivalenti e le relative ampiezze possono essere quindi valutate per tutte le categorie precedentemente riportate.

Sollecitazione primaria generale di membrana : $\overline{P_m}$

Sollecitazione primaria locale di membrana : $\overline{P_L}$

Sollecitazione primaria di membrana e di flessione : $\overline{P_m (or P_L) + P_b}$

Ampiezza delle sollecitazioni primarie e secondarie : $\overline{\Delta(P_L + P_b + Q)}$

Ampiezza delle sollecitazioni secondarie : $\overline{\Delta Q}$

Ampiezza della sollecitazione totale : $\overline{\Delta(P_L + P_b + Q + F)}$

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 47/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

5.2.5 Elastic Follow-Up

L'*Elastic Follow-Up* ha principalmente effetti negativi sulla struttura, come danneggiamento locale o anche frattura, ma va precisato che, se si esclude una progettazione particolarmente carente, questi effetti negativi sono infrequenti in assenza di creep o di irraggiamento. Infatti è solo quando la deformazione è fortemente dipendente dalla tensione applicata che si verifica l'accumulo locale di deformazione. Le regole che vengono riportate in seguito in caso di creep ed irraggiamento trascurabile escludono in pratica la possibilità di elastic follow-up.

5.2.6 Usage fraction

Creep usage fraction $U(\bar{\sigma})$

Gli effetti del creep possono essere stimati attraverso il fattore U . Per l'intervallo di tempo j è uguale al rapporto tra tempo di applicazione t_j e massimo tempo ammissibile T_j ³. Il fattore cumulativo è dato dalla somma di tutti gli j rapporti:

$$U = \sum_{j=1}^N \left(\frac{t_j}{T_j} \right) \quad (5.12)$$

Fatigue usage fraction V

Gli effetti delle variazioni di carico possono essere stimati attraverso l'utilizzo del fattore V . Per il tipo di ciclo j è uguale al rapporto tra il *numero di cicli di deformazione* n_j e il *massimo numero di cicli di deformazione* N_j ⁴. Il fattore cumulativo è dato dalla somma di tutti gli j rapporti:

$$V = \sum_{j=1} \left(\frac{n_j}{N_j} \right) \quad (5.13)$$

³Le definizioni di t_j e T_j , sono riportate nella RB 3226.1

⁴Le definizioni di n_j e N_j , sono riportate nella RB 3226.2

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 48/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

Creep rupture usage fraction W

Gli effetti del carico sul comportamento della struttura in funzione del tempo possono essere stimati attraverso il fattore W . Per l'intervallo di tempo k è uguale al rapporto tra tempo di applicazione t_k e tempo massimo ammissibile T_k ⁵. Il fattore cumulativo è dato dalla somma in k e per N intervalli:

$$W = \sum_{k=1}^N \left(\frac{t_k}{T_k} \right) \quad (5.14)$$

5.2.7 Deformazioni

La deformazione locale in un punto è rappresentata da un tensore chiamato *tensore delle deformazioni*. Le componenti di questo tensore ϵ sono le ϵ_{ij} , che non devono essere confuse con le distorsioni $\gamma_{ij} = 2\epsilon_{ij}$.

- *Deformazione totale.* È il tensore delle deformazioni corrispondente a tutti i carichi a cui è soggetto il componente e viene indicato con e .
- *Deformazione non termica.* Il tensore delle deformazioni non termiche corrisponde al tensore totale delle deformazioni meno quello dovuto alla temperatura. Corrisponde alla somma dei tensori corrispondenti ad allungamenti elastici, plastici e dovuti al creep. Viene indicato con ϵ .
- *Deformazione media.* Il tensore deformazione media ϵ_m è quel tensore le cui componenti $(\epsilon_{ij})_m$ sono uguali al valore medio lungo il *supporting line segment* delle corrispondenti componenti del tensore delle deformazioni ϵ_{ij} .

$$(\epsilon_{ij})_m = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \epsilon_{ij} dx_3 \quad (5.15)$$

- *Deformazione a flessione.* Il tensore delle deformazioni a flessione ϵ_b è il tensore le cui componente $(\epsilon_{ij})_b$ sono definite, sulla base delle

⁵Le definizioni di t_k e T_k , sono riportate nella RB 3226.3

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 49/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

componenti del tensore delle deformazioni, dalla seguente equazione:

$$(\epsilon_{ij})_b = \frac{12x_3}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \epsilon_{ij} x_3 dx_3 \quad (5.16)$$

- *Deformazione non lineare.* Il tensore delle deformazioni non lineari ϵ_{nl} è il tensore le cui componente $(\epsilon_{ij})_{nl}$ sono definite, sulla base delle componenti ϵ_{ij} $(\epsilon_{ij})_m$ $(\epsilon_{ij})_b$, dalla seguente equazione:

$$(\epsilon_{ij})_{nl} = \epsilon_{ij} - [(\epsilon_{ij})_m + (\epsilon_{ij})_b] \quad (5.17)$$

- *Deformazione media significativa.* È la deformazione positiva principale del tensore ϵ_m . Si indica con $\tilde{\epsilon}_m$
- *Deformazione lineare significativa.* È la deformazione positiva principale del tensore rappresentato dalla somma del tensore ϵ_m e del tensore ϵ_b . Si indica con $\epsilon_m \tilde{+} \epsilon_b$
- *Deformazione significativa.* È la deformazione positiva principale del tensore ϵ . Si indica con $\tilde{\epsilon}$
- *Calcolo dell'ampiezza della deformazione.* È possibile applicare la stessa formula utilizzata per le sollecitazioni⁶

$$\overline{\Delta\epsilon} = \max_{(t,t')} [\overline{\epsilon(t,t')}] \quad (5.18)$$

5.2.8 Carico di collasso

Rappresenta il livello di sollecitazione per il quale la deformazione di una struttura, fatta di un materiale rigido e perfettamente plastico, cresce senza limiti.

⁶Il procedimento dettagliato è riportato nella RB 3227.9

5.2.9 Integrale J

Per un materiale elastico non lineare, J rappresenta il rateo di rilascio di energia corrispondente alla trasformazione dell'energia elastica associata alla propagazione della rottura. È una proprietà che si estende anche ai materiali a comportamento elasto-plastico.

5.3 Metodi di analisi

I metodi di analisi che vengono identificati sono i seguenti:

- Analisi Elastica
- Analisi Elasto-plastica di una struttura soggetta ad un carico lineare monotono
- Analisi Elasto-plastica di una struttura soggetta ad un carico ciclico
- Analisi Elasto-visco-plastica di una struttura soggetta ad un carico ciclico

5.4 Criteri per la prevenzione di danneggiamenti di Tipo P

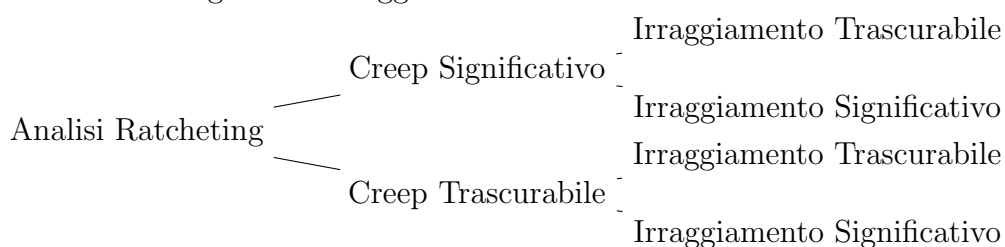
I criteri per la prevenzione di danneggiamenti di tipo P sono una parte del capitolo *Design by Analysis* delle RCC-MRx. Le regole presentate in questa parte hanno lo scopo di fornire degli adeguati margini di sicurezza con riferimento ai danneggiamenti di tipo P, ma non considerano le instabilità plastiche e elastoplastiche che sono legate a fenomeni di buckling. I limiti che vengono definiti possono essere utilizzati sia in condizioni di carico statico sia in condizioni di carico dinamico. Le regole sono suddivise in base alla significatività o meno dei fenomeni di creep ed ancora in base alla significatività o meno dei fenomeni dovuti all'irraggiamento. La deformazione progressiva non rientra tra i fenomeni che innescano danneggiamenti di tipo P.

Creep Trascurabile		Creep Significativo	
Irraggiamento Trascurabile	Irraggiamento Significativo	Irraggiamento Trascurabile	Irraggiamento Significativo
Level A Criteria		Level A Criteria	
RB 3251.11	RB 3251.21	RB 3252.11	RB 3252.2
Level C Criteria		Level C Criteria	
RB 3251.12	RB 3251.22	RB 3252.12	RB 3252.2
Level D Criteria		Level D Criteria	
RB 3251.13	RB 3251.23	RB 3252.13	RB 3252.2

Tabella 5.3: Riferimenti per le norme che prevengono danneggiamenti di tipo P

5.5 Criteri per la prevenzione di danneggiamenti di Tipo S

Questi criteri possono essere applicati solo a posteriori rispetto a quelli per la prevenzione del danneggiamento di tipo P. Se si considerano allora verificati questi criteri, è possibile proseguire l'analisi del comportamento della struttura sottoposta a carichi ciclici. In particolare l'attenzione verrà posta sul fenomeno del ratcheting e sui metodi di valutazione dei suoi effetti. Anche in questo caso la suddivisione primaria è quella riguardante il creep, mentre la secondaria riguarda l'irraggiamento.



5.6 Creep trascurabile RB 3261

5.6.1 Irraggiamento trascurabile

È possibile applicare in questo caso due tipi di analisi, *Analisi elastica* o *Analisi inelastica*.

Analisi Elastica

I metodi per la valutazione del ratchet si basano sulla definizione della **Sollecitazione Primaria Effettiva**, che viene poi confrontata con la **Sollecitazione ammissibile** S_m definita nell'Appendice A3.43.

CARATTERISTICHE DEL PERIODO OPERATIVO Il periodo di operatività del componente è caratterizzato secondo le RCC-MRx dai seguenti elementi:

- Massimo valore della temperatura media al centro di parete: $Max \theta_m$
- Massimo valore della sollecitazione primaria di membrana: $Max \overline{P_m}$
- Massimo valore della sollecitazione primaria di membrana e di flessione: $Max (\overline{P_L} + \overline{P_b})$
- Massimo valore del range della sollecitazione secondaria al centro di parete: $Max \overline{\Delta Q}$
- **nel caso particolare di strutture che presentano sollecitazioni secondarie di membrana** (come ad esempio *cilindri soggetti a gradienti termici assiali* variabili con il tempo e lo spazio:
 - Massimo valore della somma delle sollecitazioni primarie e secondarie di membrana: $Max (\overline{P_m} + \overline{Q_m})$

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 53/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- Massimo valore della somma delle sollecitazioni primarie e secondarie di membrana e della sollecitazione primaria di flessione:

$$\overline{Max(P_L + P_b + Q_m)}$$

- **nel caso particolare di sovra-sollecitazione di breve durata** (come ad esempio sollecitazioni sismiche, o dovute allo scarico rapido, o dovute a reazioni sodio-acqua, o esplosioni di vapore):

- Valori della sollecitazione primaria dovuta alla sovra-sollecitazione: $(\overline{P_m})_s$ e $(\overline{P_L + P_b})_s$

- **nel caso specifico** di riscaldamento dovuto ai gamma, con raffreddamento della parete, che causa una forte non-linearità nella distribuzione della temperatura all'interno dello spessore ed i valori minimi o massimi all'interno, $\overline{\Delta Q}$ diventa $\overline{\Delta Q'}$ e tiene conto delle sollecitazioni secondarie del secondo ordine
- lo stato di sollecitazione è lo stesso all'inizio e alla fine del periodo considerato

Le quantità elencate vengono utilizzate per calcolare i valori di $Max(\sigma_m)$, $Max(\sigma_L + \sigma_b)$ e Δq che servono poi a calcolare le sollecitazioni primarie effettive.

Si possono distinguere due casi, a seconda della presenza o meno di sollecitazioni secondarie di membrana.

1. Assenza di sollecitazioni secondarie di membrana Q_m

1a. Assenza di sovra-sollecitazioni di breve durata

$$Max(\sigma_m) = \overline{Max P_m} \quad (5.19)$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) = \overline{Max P_L + P_b} \quad (5.20)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} \quad (5.21)$$

1b. Presenza di sovra-sollecitazioni di breve durata

In questo caso i valori di $Max(\sigma_m)$ e $Max(\sigma_L + \sigma_b)$ vengono calcolati

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 54/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

senza tenere conto delle sollecitazioni di breve durata e vengono poi corrette con dei fattori k_m e k_{L+b} . I valori dei k sono funzione delle sovra-sollecitazioni.

$$Max(\sigma_m) = k_m \cdot Max \overline{P_m} \quad (5.22)$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) = k_{L+b} \cdot Max \overline{P_L + P_b} \quad (5.23)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} \quad (5.24)$$

$$dove \quad k_m = 1 + \frac{Max \overline{P_m} + (\overline{P_m})_s (\overline{P_m})_s}{2Max \overline{P_m} \overline{\Delta Q}} \quad (5.25)$$

$$dove \quad k_{L+b} = 1 + \frac{Max \overline{P_L + P_b} + (\overline{P_L + P_b})_s (\overline{P_L + P_b})_s}{2Max \overline{P_L + P_b} \overline{\Delta Q}} \quad (5.26)$$

Queste formule sono valide se sono verificate contemporaneamente le seguenti condizioni:

$$\frac{\overline{\Delta Q}}{Max \overline{P_m}} > 1.15 \quad \frac{\overline{\Delta Q}}{Max(\overline{P_L + P_b})} > 1.15$$

$$\frac{\overline{\Delta Q}}{Max \overline{P_m}} > 1.85 \quad \frac{\overline{\Delta Q}}{Max(\overline{P_L + P_b})} > 1.85$$

$$Max(\sigma_m) < (\overline{P_m} + (\overline{P_m})_s)$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) < ((\overline{P_L + P_b}) + (\overline{P_L + P_b})_s)$$

se invece queste condizioni non sono soddisfatte contemporaneamente, devono essere utilizzate le seguenti formule:

$$Max(\sigma_m) = (\overline{P_m} + (\overline{P_m})_s) \quad (5.27)$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) = ((\overline{P_L + P_b}) + (\overline{P_L + P_b})_s) \quad (5.28)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} \quad (5.29)$$

2. Presenza di sollecitazioni secondarie di membrana Q_m

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 55/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

2a. Assenza di sovra-sollecitazioni di breve durata

$$Max(\sigma_m) = \frac{1}{2}[Max\overline{P_m} + (\sigma_m)_N] \quad (5.30)$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) = \frac{1}{2}[Max\overline{P_L + P_b} + (\sigma_L + \sigma_b)_N] \quad (5.31)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} \quad (5.32)$$

dove $(\sigma_m)_N$ rappresenta la sollecitazione ottenuta applicando la regola di Neuber a $Max(\overline{P_m + Q_m})$ (Fig. 5.4)

$(\sigma_L + \sigma_b)_N$ rappresenta la sollecitazione ottenuta applicando la regola di Neuber a $Max(\overline{P_L + P_b + Q_m})$ (Fig. 5.5)

2b. Presenza di sovra-sollecitazioni di breve durata

Anche in questo caso i valori calcolati senza tener conto della sovra-sollecitazione vengono corretti da alcuni coefficienti:

$$Max(\sigma_m) = \frac{1}{2}[Max\overline{P_m} + (\sigma_m)_N] + \frac{C \cdot E_t}{E} \cdot (\overline{P_m})_s \quad (5.33)$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) = \frac{1}{2}[Max\overline{P_L + P_b} + (\sigma_L + \sigma_b)_N] + \frac{C \cdot E'_t}{E} \cdot (\overline{P_L + P_b})_s \quad (5.34)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} + (\overline{P_L + P_b})_s \quad (5.35)$$

dove $(\sigma_m)_N$ rappresenta la sollecitazione ottenuta applicando la regola di Neuber a $Max(\overline{P_m + Q_m})$ (Fig. 5.4)

$(\sigma_L + \sigma_b)_N$ rappresenta la sollecitazione ottenuta applicando la regola di Neuber a $Max(\overline{P_L + P_b + Q_m})$ (Fig. 5.5)

E_t : modulo della tangente alla curva $\sigma - \epsilon$ nel punto di ordinata $(\sigma_m)_N$ (Fig. 5.4)

E'_t : modulo della tangente alla curva $\sigma - \epsilon$ nel punto di ordinata $(\sigma_L + \sigma_b)_N$ (Fig. 5.5)

E : modulo di Young

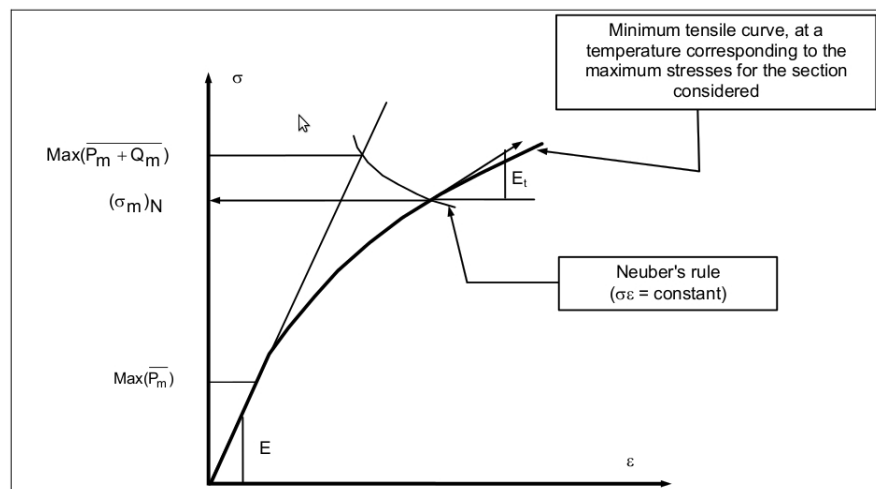


Figura 5.4: Determinazione grafica di $(\sigma_m)_N$ e di E_t

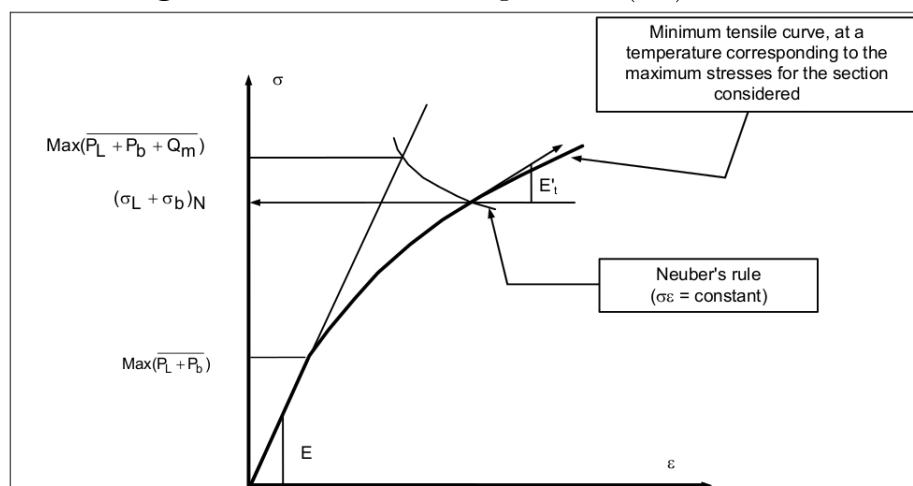


Figura 5.5: Determinazione grafica di $(\sigma_L + \sigma_b)_N$ e di E'_t

C : fattore di Elastic Follow-Up. Questo fattore deve essere preso pari a 3 a meno che il progettista non possa dimostrare di poter usare un valore più basso

SECONDARY RATIO Prima di ottenere le sollecitazioni primarie effettive è necessario calcolare le variazioni subite dalla sollecitazione secondaria in funzione delle sollecitazioni primarie ottenute finora. Per fare questo nelle RCC-MRx viene introdotto il concetto di *Secondary Ratio*, in relazione

alla sollecitazione di membrana ed in relazione alla somma delle sollecitazioni primarie. Ne deriva la definizione di questi due rapporti:

- Secondary ratio, in relazione alle sollecitazioni primarie di membrana:

$$SR_1 = \frac{\Delta q}{Max(\sigma_m)} \quad (5.36)$$

- Secondary ratio, in relazione alla somma delle sollecitazioni primarie:

$$SR_2 = \frac{\Delta q}{Max(\sigma_L + \sigma_b)} \quad (5.37)$$

EFFICIENCY INDEX Per ognuno dei due valori di secondary ratio è possibile determinare un *Efficiency Index*. Questo indice è ottenuto utilizzando un diagramma chiamato *Efficiency Diagram* (Fig.5.6)

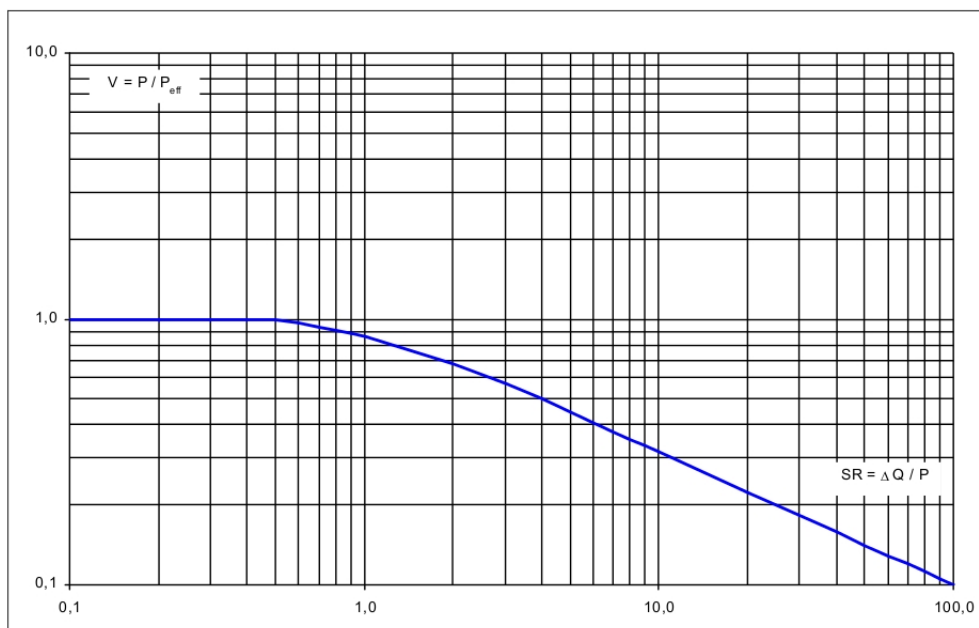


Figura 5.6: Efficiency Diagram

L'Efficiency Diagram per la deformazione progressiva fornisce la relazione tra il secondary ratio (SR) e l'indice (v). È definito come:

$$v(SR) := \begin{cases} 1, & \text{se } SR \leq 0.46, \\ 1.093 - 0.926 \cdot \frac{SR^2}{(1+SR)^2}, & \text{se } 0.46 < SR < 4, \\ \frac{1}{\sqrt{SR}}, & \text{se } SR \geq 4. \end{cases} \quad (5.38)$$

Per ottenere i valori di v è sufficiente riportare sull'ascissa dell'efficiency diagram i valori di SR_1 ed SR_2 e poi ottenere l'efficiency index per lettura diretta sull'asse y. La procedura è riportata in figura 5.7.

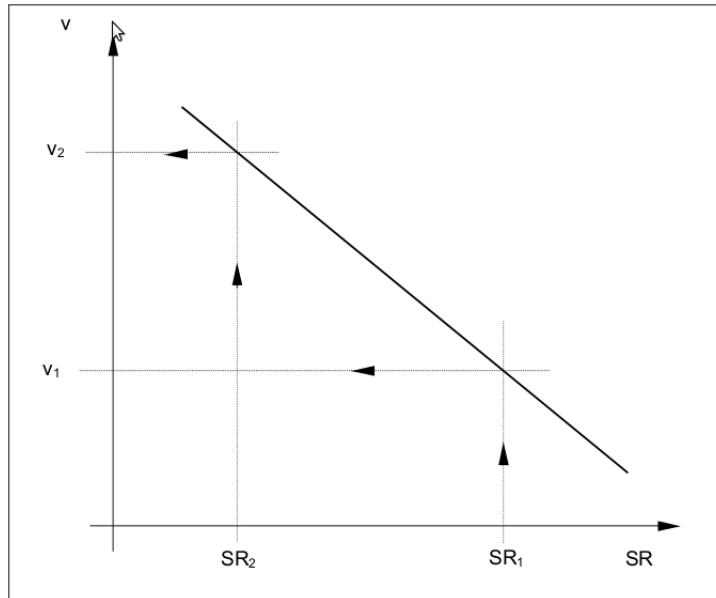


Figura 5.7: Procedura grafica per ottenere v

SOLLECITAZIONI PRIMARIE EFFETTIVE Una volta che sono noti gli *efficiency indices*, corrispondenti ad SR_1 ed SR_2 , è possibile ottenere la **sollecitazione primaria di membrana effettiva** e la **sollecitazione primaria effettiva dovuta alla somma delle sollecitazioni primarie**:

- Sollecitazione primaria di membrana effettiva:

$$P_1 = \frac{Max(\sigma_m)}{v_1} \quad (5.39)$$

- Sollecitazione primaria effettiva dovuta alla somma delle sollecitazioni primarie:

$$P_2 = \frac{Max(\sigma_L + \sigma_b)}{v_2} \quad (5.40)$$

Questi due valori sono quelli che vanno confrontati con i limiti stabiliti dai criteri di resistenza.

LEVEL A CRITERIA A questo punto, per ogni punto della struttura, devono essere verificati i seguenti criteri:

- la **sollecitazione primaria di membrana effettiva** P_1 , calcolata sulla base del periodo operativo che copre tutti gli eventi che portano a carichi per cui deve essere applicato il criterio A, non deve superare il valore di 1.3 volte la sollecitazione massima ammissibile S_m definita per ogni materiale nell'appendice A3.43:

$$P_1 \leq 1.3S_m \quad (5.41)$$

- la **sollecitazione primaria effettiva** dovuta alla somma delle sollecitazioni primarie, calcolata sullo stesso periodo operativo di P_1 , non deve superare il valore di 1.3×1.5 volte la sollecitazione massima ammissibile:

$$P_2 \leq 1.3 \times 1.5S_m \quad (5.42)$$

dove il valore 1.5 per il coefficiente moltiplicativo di S_m è valido solo per piastre, mentre per differenti geometrie i valori sono riportati nella tabella RB 3251.111.

I valori di S_m che devono essere considerati in entrambe le condizioni sono calcolati in corrispondenza della massima temperatura media di parete che può essere raggiunta nel periodo operativo considerato.

Per gli acciai austenitici, limitare la P_1 a 1.3 volte la S_m vuol dire accettare, nella peggiore delle ipotesi, una deformazione di membrana pari all'1%. Un

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 60/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

limite di 1.3×1.5 volte la S_m per la P_m , vuol dire invece accettare, nella peggiore delle ipotesi, una deformazione di membrana e flessione pari all'1.7% e una curvatura di raggio pari a 28 volte lo spessore.

Quando la sollecitazione secondaria dipende da un transitorio di temperatura o da uno spostamento impedito ad una delle estremità, il valore di S_m può essere preso uguale al valore medio degli S_m corrispondenti ai valori massimo e minimo della temperatura media di parete durante il periodo considerato.

LEVEL A CRITERIA - REGOLA ALTERNATIVA Per il periodo operativo nel quale agiscono tutti i carichi che richiedono l'utilizzo del criterio A, può essere applicato in ogni punto della struttura il seguente limite:

$$\text{Max}(\overline{P_L + P_b}) + \overline{\Delta Q} \leq 3 \cdot S_m \quad (5.43)$$

Dove per S_m valgono le stesse precisazioni riportate in precedenza.

Analisi Elasto-Plastica

Nell'analisi elasto-plastica il comportamento del materiale può essere considerato non dipendente dal tempo. In presenza di sollecitazioni secondarie di membrana significative è necessario ricorrere a metodi di analisi che tengano in conto sia questo aspetto sia la non linearità nel comportamento del materiale. Nell'Appendice A10 delle RCC-MRx sono riportati due metodi possibili di applicazione di questo tipo di analisi, tuttavia viene lasciata libertà di utilizzare un altro metodo validato dello stesso tipo. Sono inoltre definiti diversi modelli per i materiali inelastici (A10.4000 - A10.6000)

Metodo 1 Questo metodo è simile a quello riportato per l'analisi elastica tranne per il fatto che le sollecitazioni $\text{Max}(\sigma_m)$ e $\text{Max}(\sigma_L + \sigma_b)$ sono valutate attraverso calcoli di plasticità per il primo ciclo di carico. Una volta definite le sollecitazioni, il metodo ripercorre gli stessi passi dell'analisi elastica, con la definizione di *secondary ratio*, *efficiency indeces* e *sollecitazioni primarie effettive*.

Uno dei modelli di materiale presentati in A10, viene utilizzato per compiere un calcolo di plasticità su un ciclo rappresentativo di tutti i carichi termici e meccanici.

- Se, durante il corso del ciclo, la sezione considerata subisce una deformazione plastica in una sola direzione (di carico o di scarico), allora:

$$Max(\sigma_m) = \frac{1}{2} \cdot (\overline{Max(P_m)} + \sigma_1) \quad (5.44)$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) = \frac{1}{2} \cdot (\overline{Max(P_L + P_b)} + \sigma_1) \quad (5.45)$$

dove:

- $\bar{\sigma}$ è l'equivalente del tensore delle sollecitazioni secondo il criterio di Von Mises;
- P_m è il tensore delle deformazioni primarie di membrana;
- $P_L + P_b$ è il tensore delle deformazioni primarie di membrana e di flessione;
- σ_1 è il tensore delle sollecitazioni, rappresentativo di tutti i carichi, nel punto di massima deformazione plastica. per questo tensore si considera il solo contributo delle sollecitazioni di membrana.

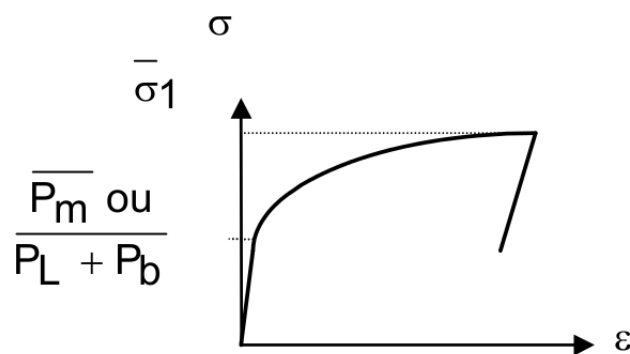


Figura 5.8: Metodo 1a per l'analisi elasto-plastica

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 62/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

- Se, durante il corso del ciclo, la sezione considerata subisce una deformazione plastica sia in carico che in scarico, allora:

$$Max(\sigma_m) = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\overline{P_m + \sigma_1}) \cdot \overline{\delta\epsilon_{p1}} + (\overline{P_m + \sigma_2}) \cdot \overline{\delta\epsilon_{p2}}}{\overline{\delta\epsilon_{p1}} + \overline{\delta\epsilon_{p2}}} \quad (5.46)$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\overline{P_L + P_b + \sigma_1}) \cdot \overline{\delta\epsilon_{p1}} + (\overline{P_L + P_b + \sigma_2}) \cdot \overline{\delta\epsilon_{p2}}}{\overline{\delta\epsilon_{p1}} + \overline{\delta\epsilon_{p2}}} \quad (5.47)$$

dove σ_1 e σ_2 sono i tensori di sollecitazione corrispondenti alle estremità del ciclo. Anche in questo caso si considerano per questi tensori solo le componenti di membrana.

$\overline{\delta\epsilon_{p1}}$ e $\overline{\delta\epsilon_{p2}}$ sono i valori equivalenti degli incrementi dei tensori per deformazioni di membrana. Se si definiscono t_1 e t_2 come l'istante di tempo corrispondente a σ_1 e σ_2 si avrà:

$$\overline{\delta\epsilon_{p1}} = \overline{\epsilon_p(t_1)} \quad (5.48)$$

$$\overline{\delta\epsilon_{p2}} = \overline{(\epsilon_p(t_2) - \epsilon_p(t_1))} \quad (5.49)$$

essendo $\epsilon_p(t)$ il tensore delle deformazioni plastiche di membrana al tempo t .

Metodo 2 Questo metodo è stato ottenuto dai metodi di analisi elastica utilizzando un efficiency diagram. È stato proposto come un modo per migliorare le previsioni ottenute con lo schema di efficienza, in particolare nei seguenti casi:

- Elastic Follow-Up significativo
- Sollecitazioni secondarie di membrana significative

Permette di calcolare l'intensità della sollecitazione in ogni punti della struttura:

$$\overline{\sigma_{max}} = \left(\frac{E\xi}{\overline{P}} \right)^{\frac{1}{2} \ln(1+\alpha \cdot \beta \cdot \gamma)} \cdot \overline{P} \quad (5.50)$$

dove:

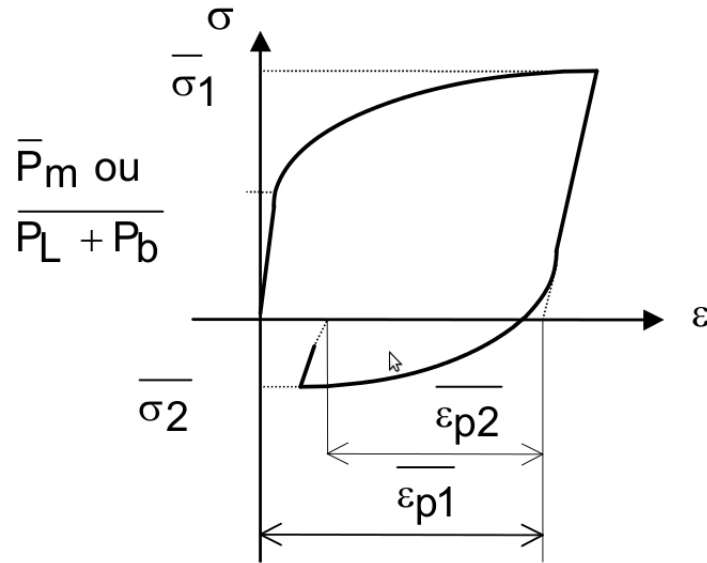


Figura 5.9: Metodo 1b per l'analisi elasto-plastica

- $\xi = \text{Max} \overline{\epsilon}_1, \overline{\Delta \epsilon}$
- $\overline{\epsilon}_1$: massimo valore della deformazione plastica + elastica ottenuta per il punto considerato attraverso un'analisi del primo ciclo di carico. L'analisi deve essere condotta in accordo con i modelli proposti nell'appendice 10
- $\overline{\Delta \epsilon}$: variazione nella deformazione elastoplastica per il ciclo
- E : modulo di Young corrispondente alla temperatura θ_{max} nel punto considerato nell'istante in cui viene raggiunto il valore di $\overline{\epsilon}_1$
- $\overline{P}$: sollecitazione primaria data da:

$$\overline{P} := \begin{cases} \overline{\sigma}_p, & \text{se } \overline{\sigma}_p \neq 0, \\ (E \cdot \xi - \overline{Q_{max}}), & \text{se } \overline{\sigma}_p = 0. \end{cases} \quad (5.51)$$

- $\overline{\sigma}_p$: sollecitazione totale ottenuta nel punto considerato durante l'analisi elastica, sotto l'azione delle forze imposte

- $\overline{Q_{max}}$: massima sollecitazione di membrana e di flessione dovuta ai carichi degli spostamenti imposti ottenuti nel punto considerato durante l'analisi elastica

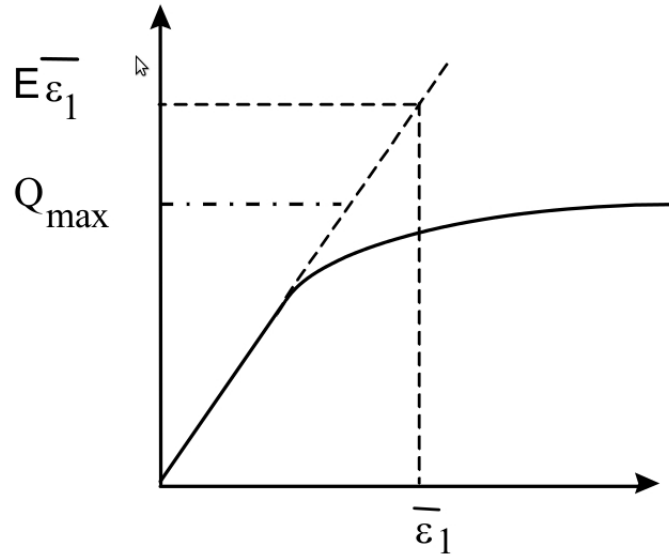


Figura 5.10: Descrizione metodo 2

Se la sollecitazione primaria σ_p è piccola, il metodo proposto può condurre a risultati estremamente conservativi. Ciò può succedere se $\sigma_p = \frac{R_{p0.2}}{6}$, essendo $R_{p0.2}$ la sollecitazione corrispondente ad una deformazione plastica dello 0.2% del limite di snervamento alla temperatura considerata

- α , β e γ sono termini correttivi che dipendono dal materiale e dal carico:

$$\alpha = \ln\left(1.75 + 2.8 \cdot \frac{R_{p0.2}}{E \cdot \overline{\epsilon}_1}\right) \quad (5.52)$$

$$\beta = \ln\left(0.25 + 2.3 \cdot \frac{R_{p0.2}}{P}\right) \quad (5.53)$$

$$\gamma = \ln\left(2.10 + 4.5 \cdot \frac{\sigma_{1\%} - R_{p0.2}}{R_{p0.2}}\right) \quad (5.54)$$

dove:

- $R_{p0.2}$: sollecitazione corrispondente alla deformazione plastica pari allo 0.2% del limite di snervamento alla temperatura θ_{max}
- $\sigma_{1\%}$: sollecitazione corrispondente alla deformazione elastica + plastica pari all'1% del limite di snervamento alla temperatura θ_{max}

Una volta nota la sollecitazione massima, possiamo ottenere una stima conservativa della deformazione massima nel punto considerato e alla temperatura considerata.

Criteri di verifica

- La deformazione plastica media significativa $(\tilde{\epsilon}_m)_{pl}$ deve essere minore della massima deformazione ammissibile D_{max}
- La deformazione plastica lineare significativa $(\epsilon_m \tilde{+} \epsilon_b)_{pl}$ deve essere minore del doppio della massima deformazione ammissibile D_{max}

I valori di D_{max} sono riportati in Appendice A3.56.

5.6.2 Irraggiamento significativo

Le regole per l'analisi elastica continuano a valere, mentre quelle per l'analisi elastoplastica sono valide nella misura in cui, sotto irraggiamento, possa essere giustificato ancora l'utilizzo del valore di D_{max}

5.7 Creep significativo RB 3262

5.7.1 Irraggiamento trascurabile

Analisi Elastica

Anche in questo caso il metodo di valutazione del danneggiamento da deformazione progressiva si basa sulla definizione delle sollecitazioni primarie effettive.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 66/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

CARATTERISTICHE DEL PERIODO OPERATIVO Il periodo operativo è caratterizzato dai seguenti elementi:

- durata del periodo
- variazione nel tempo della temperatura media al centro di parete: $\theta_m(t)$
- massimo valore della temperatura media all'interno della parete: $Max \theta_m$
- massimo valore della sollecitazione primaria di membrana: $Max \overline{P_m}$
- massimo valore della sollecitazione primaria (locale di membrana e di flessione) corretta dagli effetti del creep: $Max (\overline{P_L} + \Phi \overline{P_b})$
- massimo valore all'interno della parete dell'ampiezza della sollecitazione secondaria: $\overline{\Delta Q}$
- **nel caso particolare di strutture che presentano sollecitazioni secondarie di membrana** (come ad esempio *cilindri soggetti a gradienti termici assiali* variabili con il tempo e lo spazio:
 - massimo valore della somma delle sollecitazioni primarie e secondarie di membrana: $Max (\overline{P_m} + \overline{Q_m})$
 - massimo valore della somma delle sollecitazioni primarie e secondarie di membrana e della sollecitazione primaria di flessione corretta dagli effetti del creep: $Max (\overline{P_L} + \Phi \overline{P_b} + \overline{Q_m})$
- **nel caso particolare di sovra-sollecitazione di breve durata** (come ad esempio sollecitazioni sismiche, o dovute allo scarico rapido, o dovute a reazioni sodio-acqua, o esplosioni di vapore):
 - valori della sollecitazione primaria dovuta alla sovra-sollecitazione: $(\overline{P_m})_s$ e $(\overline{P_L} + \overline{P_b})_s$
- lo stato di sollecitazione è lo stesso all'inizio e alla fine del periodo considerato

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 67/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

Le quantità elencate vengono utilizzate per calcolare i valori di $Max(\sigma_m)$, $Max(\sigma_L + \sigma_b)$ e Δq che servono poi a calcolare le sollecitazioni primarie effettive.

Si possono distinguere due casi, a seconda della presenza o meno di sollecitazioni secondarie di membrana.

1. Assenza di sollecitazioni secondarie di membrana Q_m

1a. Assenza di sovra-sollecitazioni di breve durata

$$Max(\sigma_m) = Max\overline{P_m} \quad (5.55)$$

$$Max(\sigma_L + \Phi\sigma_b) = Max\overline{P_L + \Phi P_b} \quad (5.56)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} \quad (5.57)$$

1b. Presenza di sovra-sollecitazioni di breve durata

In questo caso i valori di $Max(\sigma_m)$ e $Max(\sigma_L + \Phi\sigma_b)$ vengono calcolati senza tenere conto delle sollecitazioni di breve durata e vengono poi corrette con dei fattori k_m e k_{L+b} . I valori dei k sono funzione delle sovra-sollecitazioni.

$$Max(\sigma_m) = k_m \cdot Max\overline{P_m} \quad (5.58)$$

$$Max(\sigma_L + \Phi\sigma_b) = k_{L+b} \cdot Max\overline{P_L + \Phi P_b} \quad (5.59)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} \quad (5.60)$$

$$dove \quad k_m = 1 + \frac{Max\overline{P_m} + (\overline{P_m})_s}{2Max\overline{P_m}} \frac{(\overline{P_m})_s}{\overline{\Delta Q}} \quad (5.61)$$

$$dove \quad k_{L+b} = 1 + \frac{Max\overline{P_L + \Phi P_b} + (\overline{P_L + \Phi P_b})_s}{2Max\overline{P_L + \Phi P_b}} \frac{(\overline{P_L + \Phi P_b})_s}{\overline{\Delta Q}} \quad (5.62)$$

Queste formule sono valide se sono verificate contemporaneamente le seguenti condizioni:

$$\frac{\overline{\Delta Q}}{Max\overline{P_m}} > 1.15 \quad \frac{\overline{\Delta Q}}{Max(\overline{P_L + \Phi P_b})} > 1.15$$

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 68/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

$$\frac{\overline{\Delta Q}}{Max \overline{P_m}} > 1.85 \quad \frac{\overline{\Delta Q}}{Max(\overline{P_L + P_b})} > 1.85$$

$$Max(\sigma_m) < \overline{(P_m + (P_m)_s)}$$

$$Max(\sigma_L + \sigma_b) < \overline{((P_L + P_b) + (P_L + P_b)_s)}$$

se invece queste condizioni non sono soddisfatte contemporaneamente, devono essere utilizzate le seguenti formule:

$$Max(\sigma_m) = \overline{(P_m + (P_m)_s)} \quad (5.63)$$

$$Max(\sigma_L + \Phi \sigma_b) = \overline{((P_L + \Phi P_b) + (P_L + P_b)_s)} \quad (5.64)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} \quad (5.65)$$

2. Presenza di sollecitazioni secondarie di membrana Q_m

2a. Assenza di sovra-sollecitazioni di breve durata

$$Max(\sigma_m) = \frac{1}{2}[Max \overline{P_m} + (\sigma_m)_N] \quad (5.66)$$

$$Max(\sigma_L + \Phi \sigma_b) = \frac{1}{2}[Max \overline{P_L + \Phi P_b} + (\sigma_L + \sigma_b)_N] \quad (5.67)$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} \quad (5.68)$$

dove $(\sigma_m)_N$ rappresenta la sollecitazione ottenuta applicando la regola di Neuber a $Max(\overline{P_m + Q_m})$ (Fig. 5.11)

$(\sigma_L + \sigma_b)_N$ rappresenta la sollecitazione ottenuta applicando la regola di Neuber a $Max(\overline{P_L + \Phi P_b + Q_m})$ (Fig. 5.12)

2b. Presenza di sovra-sollecitazioni di breve durata

Anche in questo caso i valori calcolati senza tener conto della sovra-sollecitazione vengono corretti da alcuni coefficienti:

$$Max(\sigma_m) = \frac{1}{2}[Max \overline{P_m} + (\sigma_m)_N] + \frac{C \cdot E_t}{E} \cdot (\overline{P_m})_s \quad (5.69)$$

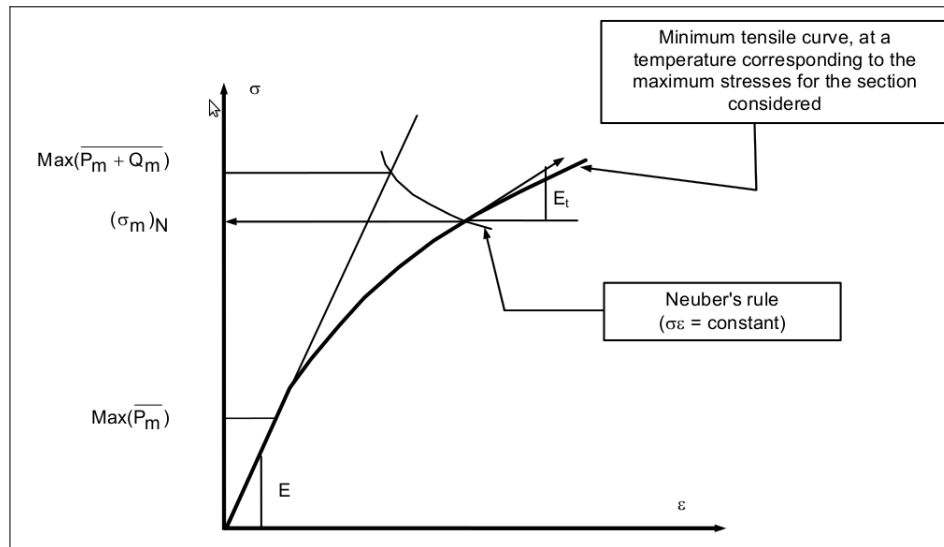


Figura 5.11: Determinazione grafica di $(\sigma_m)_N$ e di E_t

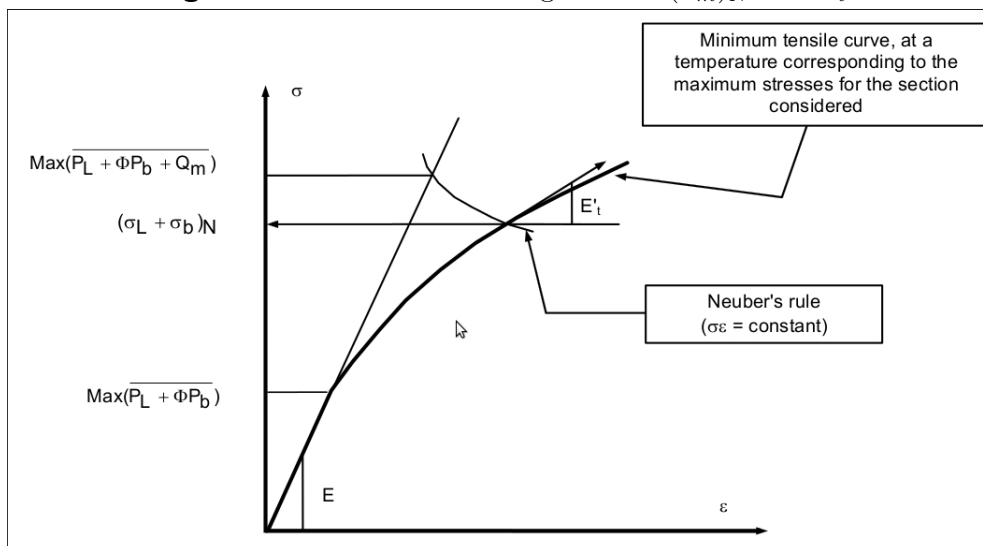


Figura 5.12: Determinazione grafica di $(\sigma_L + \Phi\sigma_b)_N$ e di E'_t

$$\begin{aligned} \text{Max}(\sigma_L + \Phi\sigma_b) = \frac{1}{2} [\text{Max}\overline{P_L + \Phi P_b} + (\sigma_L + \sigma_b)_N] \\ + \frac{C \cdot E'_t}{E} \cdot (\overline{P_L + P_b})_s \quad (5.70) \end{aligned}$$

$$\Delta q = \overline{\Delta Q} + (\overline{P_L + P_b})_s \quad (5.71)$$

dove $(\sigma_m)_N$ rappresenta la sollecitazione ottenuta applicando la re-

gola di Neuber a $Max(\overline{P_m + Q_m})$ (Fig. 5.11)

$(\sigma_L + \Phi\sigma_b)_N$ rappresenta la sollecitazione ottenuta applicando la regola di Neuber a $Max(\overline{P_L + \Phi P_b + Q_m})$ (Fig. 5.12)

E_t : modulo della tangente alla curva $\sigma - \epsilon$ nel punto di ordinata $(\sigma_m)_N$ (Fig. 5.11)

E'_t : modulo della tangente alla curva $\sigma - \epsilon$ nel punto di ordinata $(\sigma_L + \sigma_b)_N$ (Fig. 5.12)

E : modulo di Young

C : fattore di Elastic Follow-Up. Questo fattore deve essere preso pari a 3 a meno che il progettista non possa dimostrare di poter usare un valore più basso

SECONDARY RATIO Prima di ottenere le sollecitazioni primarie effettive è necessario calcolare le variazioni subite dalla sollecitazione secondaria in funzione delle sollecitazioni primarie ottenute finora.

- Secondary ratio, in relazione alle sollecitazioni primarie di membrana:

$$SR_1 = \frac{\Delta q}{Max(\sigma_m)} \quad (5.72)$$

- Secondary ratio, in relazione alla somma delle sollecitazioni primarie:

$$SR_3 = \frac{\Delta q}{Max(\sigma_L + \Phi\sigma_b)} \quad (5.73)$$

EFFICIENCY INDEX Per ognuno dei due valori di secondary ratio è possibile determinare l'*Efficiency Index* utilizzando l'*Efficiency Diagram* (Fig.5.6). La procedura per ottenere SR_1 ed SR_3 è riportata in figura 5.13.

SOLLECITAZIONE PRIMARIA EFFETTIVA Una volta che sono noti gli *efficiency indices*, corrispondenti ad SR_1 ed SR_3 , è possibile ottenere la **sollecitazione primaria di membrana effettiva** e la **sollecitazione primaria effettiva dovuta alla somma delle sollecitazioni primarie**:

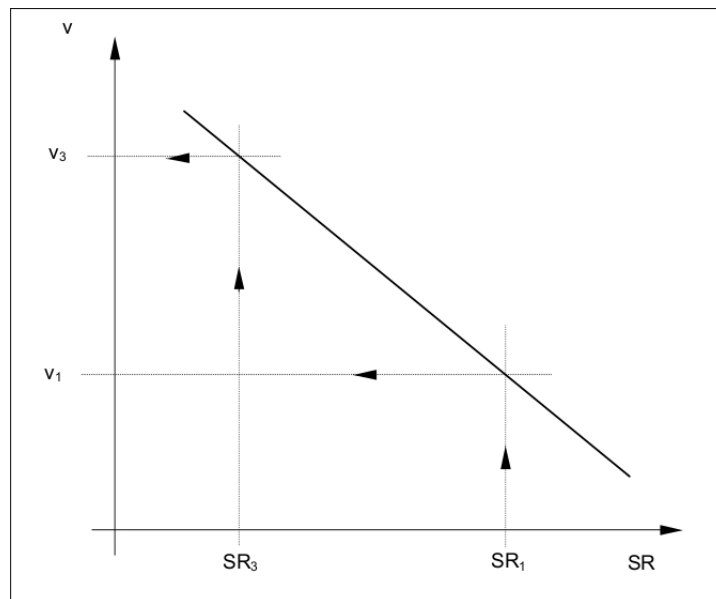


Figura 5.13: Procedura grafica per ottenere v

- Sollecitazione primaria di membrana effettiva:

$$P_1 = \frac{Max(\sigma_m)}{v_1} \quad (5.74)$$

- Sollecitazione primaria effettiva dovuta alla somma delle sollecitazioni primarie, corretta per effetto del creep:

$$P_3 = \frac{Max(\sigma_L + \Phi\sigma_b)}{v_3} \quad (5.75)$$

Questi due valori sono quelli che vanno confrontati con i limiti stabiliti dai criteri di resistenza.

LEVEL A CRITERIA Dopo aver verificato il rispetto dei criteri relativi all'analisi in assenza di creep, è necessario verificare i seguenti limiti per ogni punto della struttura:

- la somma della deformazione plastica e della deformazione (ϵ) associata

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 72/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

al creep, in corrispondenza di una sollecitazione primaria di membrana effettiva pari a $1.25 P_1$, non deve superare l'1%

- la somma della deformazione plastica e della deformazione (ϵ) associata al creep, in corrispondenza di una sollecitazione primaria effettiva corretta per gli effetti del creep pari a $1.25 P_3$, non deve superare il 2%

Questi limiti devono essere ridotti di un fattore 2 in caso di giunti saldati.

La deformazione plastica deve essere determinata come indicato nell'Appendice A3.45 e la deformazione totale dovuta al creep come indicato nell'Appendice A3.46, considerando, un periodo che comprenda tutti gli eventi per i quali i carichi devono soddisfare il criterio di livello A, e la massima temperatura del periodo.

Analisi Elasto-visco-plastica

Nell'Appendice A11 delle RCC-MRx sono riportati due modelli per la descrizione di un materiale a comportamento Elasto-visco-plastico.

Dopo aver sottoposto la struttura a tutti i carichi che richiedono la verifica del criterio di livello A, devono essere verificati i seguenti limiti:

- la somma della plasticizzazione media significativa e della deformazione da creep, $(\tilde{\epsilon}_m)_{pl+fl}$, deve risultare minore della massima deformazioni ammissibile D_{max} definita in appendice A3.56
- la somma della plasticizzazione lineare significativa e della deformazione da creep, $(\tilde{\epsilon}_m + \tilde{\epsilon}_b)_{pl+fl}$, deve risultare minore di $2D_{max}$

In caso di giunti saldati, essendo θ l'angolo tra la direzione perpendicolare al giunto saldato e quella della deformazione significativa $\tilde{\epsilon}$, il valore di quest'ultima deve essere limitato a $0.5 \cdot (1 + \sin^2 \theta) \cdot D_{max}$.

Per verificare questi limiti è richiesto un calcolo che fornisca gli esatti valori delle deformazioni, o al massimo un limite superiore, derivanti da tutti i cicli. Può essere tuttavia definito un ciclo di inviluppo, le cui caratteristiche devono essere significative dell'intera vita operativa del componente. Spesso è possibile utilizzare il ciclo meno favorevole con una durata pari all'intera vita del componente.

Capitolo 6

La normativa ASME per il ratcheting

Nelle norme ASME¹ vengono definiti dei limiti sui carichi in modo da ridurre la deformazione plastica residua all'1% o meno. Se inoltre vengono specificati dei requisiti particolari per le deformazioni, il progettista deve assicurare che questi non siano violati pur assumendo che la deformazione limite dell'1% si verifichi all'interno della struttura secondo la distribuzione che porta al peggiore possibile stato di deformazione consistente con le direzioni di carico. Nelle regioni per cui sono previste elevate temperature, la deformazione plastica residua massima non deve superare i seguenti limiti:

- a) deformazione media attraverso lo spessore : $1\% \epsilon_m \leq 1\%$
- b) deformazione sulla superficie, dovuta ad una distribuzione lineare equivalente di deformazioni nello spessore : $2\% \epsilon_b \leq 2\%$
- c) deformazione locale in ogni punto : $5\% \epsilon_L \leq 5\%$

I limiti sopra riportati si applicano alle deformazioni plastiche residue calcolate per il componente in esame dopo un determinato periodo operativo o per un periodo di stato stazionario a valle del quale non si verifichi nessun transitorio di rilievo. Questi limiti si applicano al massimo valore positivo

¹Edizione 1998

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 74/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

delle tre deformazioni principali ². Se la deformazione viene calcolata in più punti nello spessore, le deformazioni risultanti vengono mediate e linearizzate sull'intero componente e poi combinate per ottenere le deformazioni principali da confrontare con i limiti.

Prima di introdurre i metodi di analisi è necessario riportare alcune linee guida riportate nella norma:

- Un singolo ciclo non può essere diviso in più cicli al fine di soddisfare i limiti
- Deve essere definito almeno un ciclo che includa la massima ampiezza delle sollecitazioni secondarie, Q_R , ed il massimo valore di $(P_L + \frac{P_b}{K_t})$, che si ottengono durante le condizioni operative A, B o C³ ⁴.
- Ogni numero di cicli può essere raggruppato e valutato nell'insieme
- Devono essere applicate le seguenti definizioni:

$$X \equiv \left(P_L + \frac{P_b}{K_t} \right)_{max} \div S_y \quad (6.1)$$

dove

- $(P_L + P_b/K_t)_{max}$ è il massimo valore delle sollecitazioni primarie
- S_y è la media dei valori di carico di snervamento calcolata tra le temperature di parete medie massima e minima

$$Y \equiv \frac{(Q_R)_{max}}{S_y} \quad (6.2)$$

dove

- $(Q_R)_{max}$ è la massima ampiezza delle sollecitazioni secondarie

²Una deformazione positiva è definita come quella per la quale la lunghezza dell'elemento, nella direzione della deformazione, cresce.

³Il valore di K_t può essere determinato utilizzando l'equazione $K_t = (K + 1)/2$. Il fattore K_t tiene conto della riduzione delle sollecitazioni di flessione per le fibre esterne dovuta al creep. K invece è il rapporto tra la sollecitazione che produce un sezione completamente plasticizzata e la sollecitazione che produce l'iniziale snervamento delle fibre esterne.

⁴La definizione di condizioni operative secondo le norme ASME è riportata nella sezione NH 3113

6.1 Analisi Elastica

Secondo le norme ASME l'analisi elastica può essere condotta seguendo tre strade differenti.

6.1.1 ASME NH Appendix T-1322 : Test No. A-1

Per il Test A-1:

$$X + Y \leq \frac{S_a}{S_y} \quad (6.3)$$

dove S_a è il minore tra:

- $1.25S_t^5$ utilizzando la più alta temperatura media di parete e per un periodo di $10^4 hr$
- la media dei due valori di S_y associati alle temperature medie massima e minima di parete durante il ciclo

6.1.2 ASME NH Appendix T-1323 : Test No. A-2

Per il Test A-2:

$$X + Y \leq 1 \quad (6.4)$$

per quei cicli durante i quali la temperatura media di parete ad una delle estremità è al di sotto delle temperature applicabili riportate in tabella

6.1.3 ASME NH Appendix T-1324 : Test No. A-3

Per poter effettuare il test numero 3 è richiesta la verifica dei limiti riportati nelle NB 3222.2, NB 3222.3 ed NB 3222.5 e i requisiti specifici del test.

⁵ S_t è una sollecitazione limite dipendente dalla temperatura e dal tempo; i dati da cui sono stati ricavati i valori di S_t sono stati ottenuti da test a lungo termine, carico costante e uniassiali. Per ogni tempo t , i valori di S_t devono essere il minore tra:

- il 100% della sollecitazione media richiesta per ottenere una deformazione totale dell'1%
- l'80% della minima sollecitazione che causa creep terziario
- il 67% della minima sollecitazione che causa rottura

Materiali	Temperatura °F
Type 304 SS	948
Type 316 SS	1011
Alloy 800H	1064
2 ¼Cr-1Mo	801

Tabella 6.1: Temperature Test No. A-2

NB 3222.2 - Intensità di sollecitazione primaria più secondaria

Questa sollecitazione è ottenuta dal più alto valore in ogni punto dello spessore della sezione della somma di, sollecitazione generale o locale primaria di membrana, sollecitazione primaria di flessione e sollecitazione secondaria. Il massimo valore dell'ampiezza dell'intensità della sollecitazione primaria più secondaria deve essere al massimo pari a $3S_m$.

NB 3222.3 - Intensità di sollecitazione di espansione

Questa sollecitazione è ottenuta dal più alto valore della sollecitazione, trascurando le discontinuità locali, prodotta in ogni punto dello spessore della sezione dai carichi che risultano dalla limitazione degli spostamenti liberi. Il massimo valore possibile per l'ampiezza di questa sollecitazione è $3S_m$.

NB 3222.5 - Thermal Stress Ratchet

- a) Per evitare la deformazione ciclica in una struttura assial-simmetrica, su cui agisce una pressione interna stazionaria, è necessario che il valore limite della massima sollecitazione termica ciclica venga considerato come segue:

sia⁶⁷

$$x = \frac{\text{massima sollecitazione generale di membrana}}{\text{carico di snervamento } S_y} \quad (6.5)$$

$$y' = \frac{\text{massimo valore dell'ampiezza della sollecitazione termica}}{\text{Carico di snervamento } S_y} \quad (6.6)$$

⁶Calcolata su base elastica

⁷È possibile utilizzare il valore $1.5S_m$ in caso questo sia maggiore di S_y

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 77/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

caso 1. Per una variazione lineare di temperatura all'interno dello spessore:

$$\text{per } 0 < x < 0.5 \rightarrow y' = \frac{1}{x} \quad (6.7)$$

$$\text{per } 0.5 < x < 1.0 \rightarrow y' = 4(1 - x) \quad (6.8)$$

caso 2. Per una variazione parabolica sempre crescente o sempre decrescente della temperatura all'interno dello spessore:

$$\text{per } 0.615 < x < 1.0 \rightarrow y' = 5.2(1 - x) \quad (6.9)$$

$$\text{per } x = 0.3 \rightarrow y' = 4.65 \quad (6.10)$$

$$\text{per } x = 0.4 \rightarrow y' = 3.55 \quad (6.11)$$

$$\text{per } x = 0.5 \rightarrow y' = 2.70 \quad (6.12)$$

- b) L'utilizzo del carico di snervamento S_m nelle relazioni precedenti permette una piccola deformazione progressiva durante ogni ciclo. Se il carico di snervamento è maggiore del limite a fatica del materiale, allora quest'ultimo valore può essere utilizzato in presenza di elevato numero di cicli.

Requisito A

$$\sum_i \frac{t_i}{t_{id}} \leq 0.1 \quad (6.13)$$

dove:

t_i = intervallo di tempo in cui il componente si trova ad operare a temperatura T_i

- t_{id} massimo intervallo di tempo possibile alla temperatura T_i . Per determinare questo valore, si utilizzano dei diagrammi come quello riportato in figura 6.1. Entrando nel diagramma con la temperatura T_i e con una sollecitazione del valore di 1.5 volte la S_y associata a T_i è possibile determinare il tempo massimo. Se la $S_y|_{T_i}$ è oltre i limiti del diagramma, questo metodo non è applicabile.

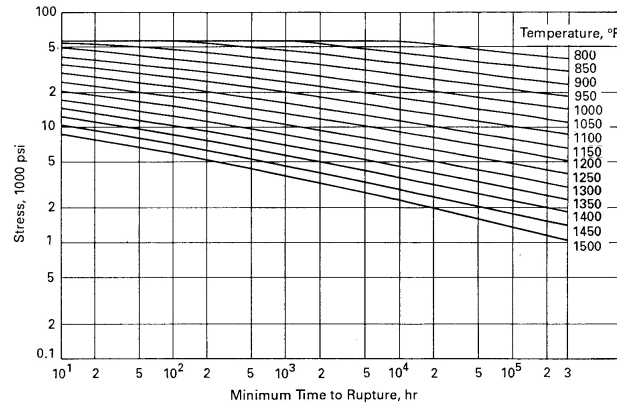


Figura 6.1: Sollecitazione minima a rottura per acciaio inossidabile tipo 304

Requisito B

$$\sum \epsilon_i \leq 0.2\% \quad (6.14)$$

dove ϵ_i è la deformazione da creep che ci si aspetta se una sollecitazione pari a $1.25S_y|_{T_i}$ viene applicata per tutto l'intervallo di tempo in cui il componente è a temperatura T_i .

Requisito C

In accordo con le NB-3222.2 e NB-3222.3, l'ampiezza massima della sollecitazione linearizzata data dalle sollecitazioni primarie più le secondarie deve soddisfare il seguente criterio:

$$\Delta(P_L + P_b + Q) \leq 3\overline{S_m} \quad (6.15)$$

dove i valori di $3\overline{S_m}$ possono essere determinati come segue:

- Se un solo estremo della sollecitazioni si presenta ad alta temperatura:

$$3\overline{S_m} = (1.5S_m + S_{rH}) \quad (6.16)$$

- Se entrambi gli estremi della sollecitazione si presentano ad elevata temperatura:

$$3\overline{S_m} = (S_{rL} + S_{rH}) \quad (6.17)$$

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 79/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

dove S_{rH} e S_{rL} sono i carichi di rilassamento associati alle temperature dell'estremo caldo e di quello freddo del ciclo di sollecitazione.

6.2 Analisi Inelastica semplificata

I limiti per la deformazione inelastica possono considerarsi soddisfatti se sono soddisfatti i limiti di uno qualunque dei seguenti test, Test No.B-1, Test No. B-2 e Test No. B-3.

Le temperatura utilizzate in queste norme sono la temperatura calda e quella fredda corrispondenti alle estremità del ciclo di sollecitazione, cosicché possa essere rispecchiata una temperatura del metallo più realistica.

Il Test No. B-1 può essere usato solo per strutture assialsimmetriche soggette a carichi assialsimmetrici e lontano dalla discontinuità strutturali locali oppure per strutture in cui il picco della sollecitazione termica nella parete è trascurabile (distribuzione lineare della sollecitazione termica nella parete).

Il Test No.B-2, più conservativo, è applicabile ad ogni carico o struttura. Il Test No.B-3 può essere utilizzato per cicli in regime R_1 ed R_2 del diagramma di Bree, che è applicabile a strutture assialsimmetriche di tipo *shell* soggette e pressioni interne e sollecitazioni termiche generate da gradienti lineari di temperatura nella parete. La stessa procedura può essere utilizzata per i cicli in regime S_1, S_2 e P , al fine di minimizzare il conservativismo nelle deformazioni che vengono calcolate in caso di pochi cicli severi.

Nel calcolo dell'indice di sollecitazione primaria X , le sollecitazioni secondarie caratterizzate da fenomeni di follow-up sono classificate come sollecitazioni primarie. Per il calcolo degli indici X e Y il valore di S_{yL} può essere utilizzato in sostituzione di S_y per i Test Nos. B-1 e B-2.

Una caratteristica importante di queste norme è che a prescindere dal fatto che siano considerati o meno tutti i cicli, il tempo che deve essere considerato nell'analisi è sempre il tempo di vita totale.

6.2.1 ASME NH Appendix T-1332 : Test Nos. B-1 and B-2

Questa norma può essere applicata solo quando la temperatura di parete media per una delle sollecitazioni limite che definiscono l'ampiezza della sollecitazione secondaria è al di sotto del valore riportato in tabella 6.2. Le

Materiale	Temperatura °C
Type 304 SS	509
Type 316 SS	544
Alloy 800 H	573
2 ¼Cr- 1Mo	427
9Cr-1Mo-V	504

Tabella 6.2: Temperatura applicabili per i Test Nos. B-1 e B-2

intensità di sollecitazione primaria e secondaria calcolate elasticamente sono utilizzate per determinare la sollecitazione effettiva da creep,

$$\sigma_c = Z \cdot S_{yL} \quad (6.18)$$

che successivamente viene utilizzata per calcolare la deformazione totale ratcheting creep. Il parametro adimensionale, Z , che è determinato attraverso gli indici di sollecitazione X ed Y , è dato per i Test Nos. B-1 e B-3 in figura 6.2 e per il Test No- B-2 in figura 6.3. Nella figura 6.2 il parametro Z può essere ottenuto nei seguenti modi:

a) nei regimi S_2 e P

$$Z = X \cdot Y \quad (6.19)$$

b) in regime S_1

$$Z = Y + 1 - 2 \cdot \sqrt{(1 - x) \cdot Y} \quad (6.20)$$

c) in regime E

$$Z = X \quad (6.21)$$

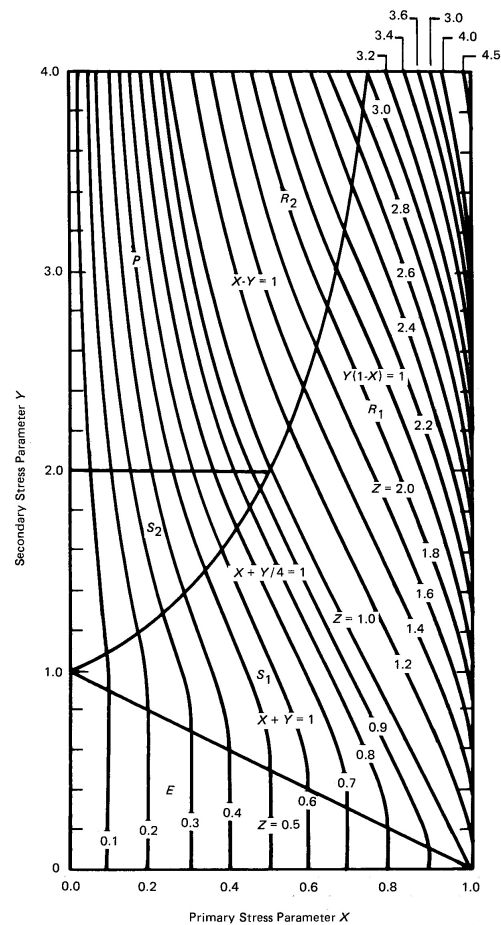


Figura 6.2: Diagramma di Bree per la determinazione di Z dei Test Nos. B-1 e B-3

La deformazione combinata Creep-Ratcheting è determinata moltiplicando σ_c per 1.25 e valutando il creep associato ad una sollecitazione pari a $1.25\sigma_c$ tenuta costante per tutta la vita operativa. Le curve isocrone sollecitazione-deformazione (figura 6.4) possono essere utilizzate per determinare l'interazione creep-ratcheting. L'incremento della deformazione da creep, per ogni intervallo di tempo, può essere calcolato separatamente attraverso il metodo mostrato in figura 6.5. Le curve appropriate per ogni materiale sono disponibili nell'appendice T-1800. Tutte le deformazioni creep-ratcheting calcolate devono essere sommate ed il valore totale deve essere minore dell'1% per i metalli di base e minore dello 0.5% per i metalli di saldatura. È importante

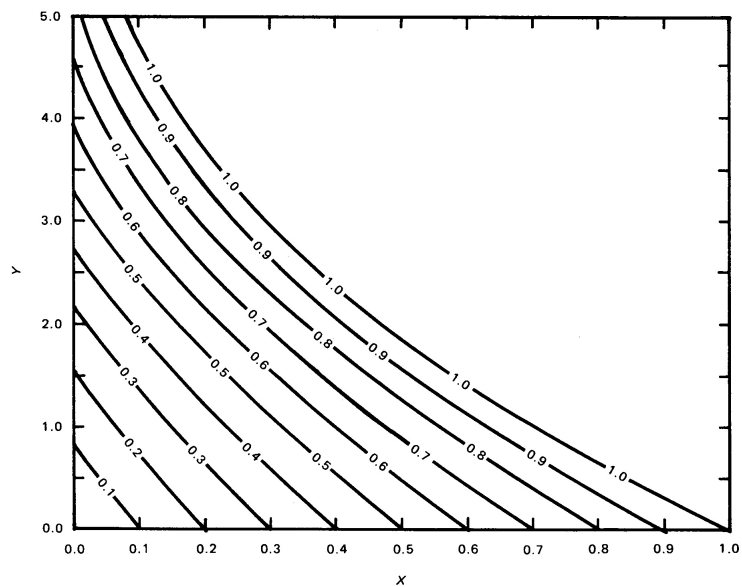


Figura 6.3: Diagramma di Bree per la determinazione di Z del Test No. B-2

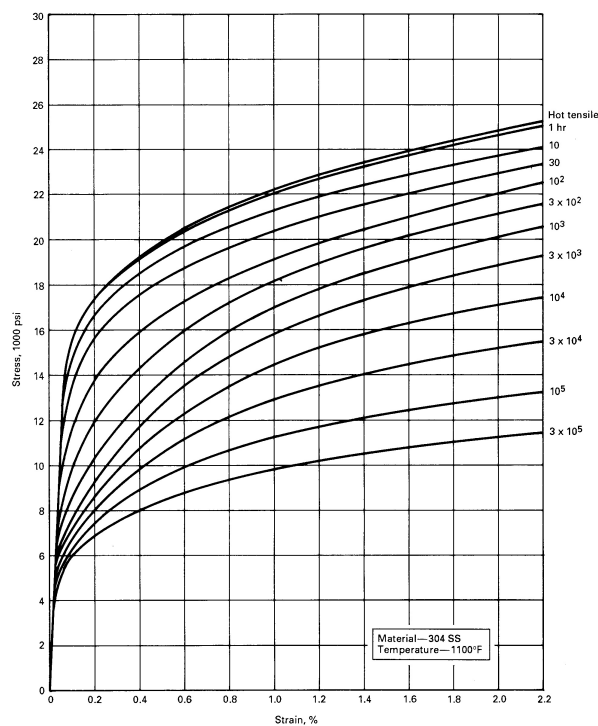


Figura 6.4: Esempio di Curve isocrone sollecitazione-deformazione per un acciaio inossidabile di tipo 304

ricordare che il Test No. B-1 è applicabile solo nel caso in cui σ_c sia minore del carico di snervamento S_{yH}

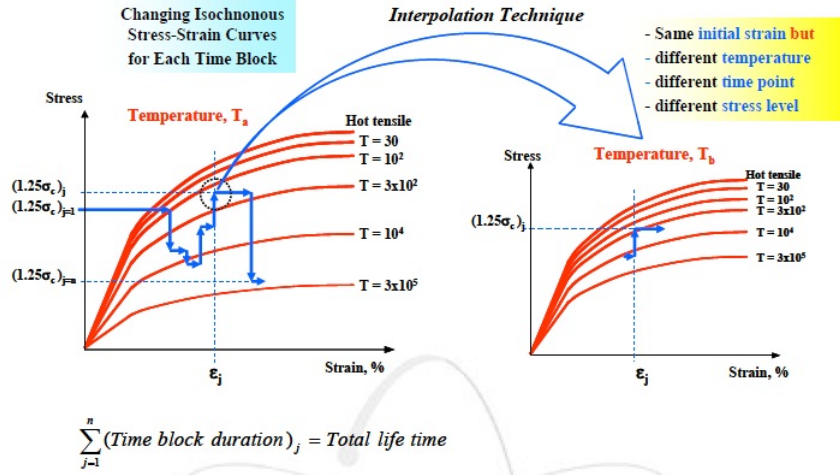


Figura 6.5: Applicazione del metodo per la determinazione dell'interazione creep-ratcheting

6.2.2 ASME NH Appendix T-1333 : Test No. B-3

Questa procedura si applica ai cicli caratterizzati dal trovarsi in regime R_1 o R_2 dove il Test No. B-1 non è applicabile. Il metodo riportato di seguito è applicabile solo a strutture assialsimmetriche soggette a carichi assialsimmetrici e lontano dalle discontinuità strutturali.

La deformazione totale inelastica durante la vita del componente è data da:

$$\sum \epsilon_t = \sum \nu + \sum \eta + \sum \delta \quad (6.22)$$

Ogni parte dell'equazione è ottenuta come segue:

- a) $\sum \eta$ = incremento di deformazione plastica da ratcheting per $[\sigma_{cL}] \geq S_{yH}$

$$\sum \eta = \frac{1}{E_H} [([\sigma_{cL}] - S_{yH}) + ([\sigma_{cH}] - S_{yL})] \text{ for } Z_L \leq 1.0 \quad (6.23)$$

$$\sum \eta = \frac{1}{E_L} ([\sigma_{cL}] - S_{yL}) + \frac{1}{E_L} ([\sigma_{cH}] - S_{yH}) \text{ for } Z_L > 1.0 \quad (6.24)$$

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 84/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

dove $[\sigma_{cL}]$ e $[\sigma_{cH}]$ sono le sollecitazioni effettive per gli estremi, caldo e freddo, del ciclo dati da:

$$[\sigma_{cL}] = Z_L S_{yL} \quad [\sigma_{cH}] = Z_H S_{yH} \quad (6.25)$$

- b) $\sum \delta$ = incremento della deformazione da creep dovuta al rilassamento della sollecitazione :

$$\sum \delta = \frac{1}{E_H} \frac{S_{yH}^2 - \sigma_c^2}{\sigma_c} \text{ per i cicli per i quali } [\sigma_{cL}] \geq S_{yH} \quad (6.26)$$

$$\sum \delta = \frac{1}{E_H} \frac{[\sigma_{cL}]^2 - \sigma_c^2}{\sigma_c} \text{ per i cicli per i quali } [\sigma_{cL}] < S_{yH} \quad (6.27)$$

- c) $\sum \nu$ = deformazioni inelastiche ottenute dalle curve isocrone del Test No. B-1

Capitolo 7

Confronto tra RCC-MRx e ASME, in presenza di creep significativo

In questo capitolo si riporta un confronto tra le metodologie di analisi riportate nelle norme RCC-MRx e quelle riportate nelle norme ASME applicate ad un Acciaio di tipo 9Cr-1Mo.

Si riportano brevemente gli *step* principali per la valutazione del ratcheting nei seguenti casi:

- **RCC-MRx** Analisi Elastica
- **ASME NH** Analisi Elastica
- **ASME NH** Analisi Inelastica Semplificata

RCC-MRx, ANALISI ELASTICA Il metodo presentato nelle RCC-MRx procede per passi successivi:

1. Determinazione dei *Secondary Ratio* SR

(a) Determinazione del *Secondary Ratio* relativo alla sollecitazione primaria di membrana SR_1 ,

$$SR_1 = \frac{\Delta q}{P_m} \quad (7.1)$$

(b) Determinazione del *Secondary Ratio* relativo alla somma delle sollecitazioni primarie in presenza di *creep* non trascurabile SR_3 ,

$$SR_3 = \frac{\Delta q}{P_L + \Phi P_b} \quad (7.2)$$

2. Determinazione degli *Efficiency index* v

- La determinazione di v si effettua attraverso l'utilizzo del diagramma di efficacia (Figura 7.1) definito analiticamente dalle equazioni 5.38.

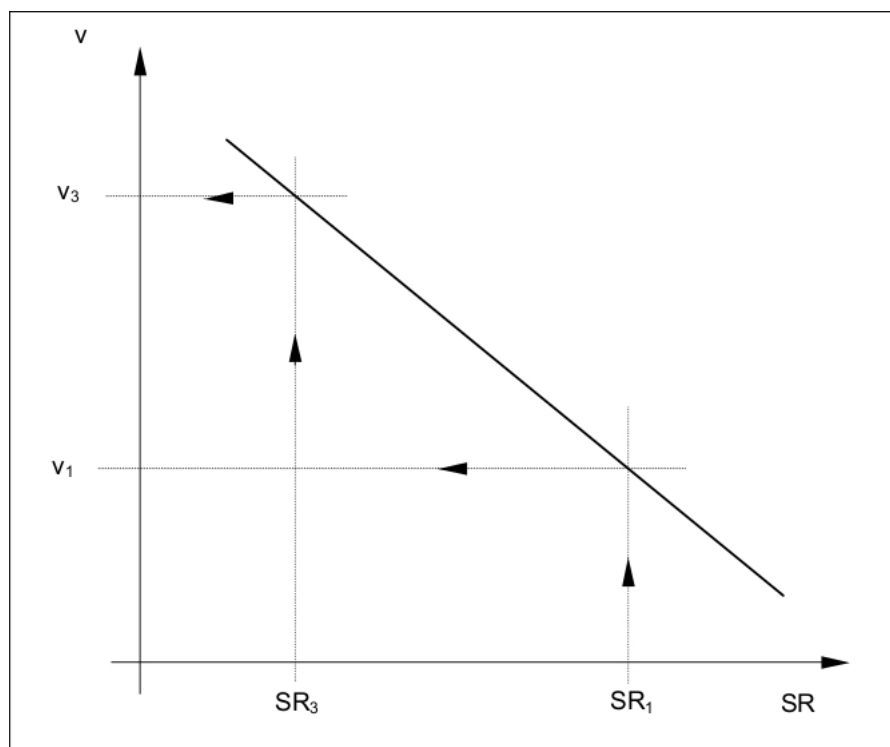


Figura 7.1: Determinazione dell'*efficiency index*

3. Determinazione delle intensità di sollecitazione primarie effettive P

- I valori di v ottenuti vengono usati per la determinazione delle

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 87/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

sollecitazioni effettive:

$$P_1 = \frac{Max(P_m)}{v_1} \quad (7.3)$$

$$P_3 = \frac{Max(P_L + \Phi P_b)}{v_3} \quad (7.4)$$

4. Verifica dei seguenti limiti:

- $P_1 \leq 1.3S_m$
- $P_3 \leq 1.5 \times 1.3S_m$
- Deformazione plastica + deformazione da creep corrispondenti ad una sollecitazione di 1.25 volte P_1 minore dell'1%
- Deformazione plastica + deformazione da creep corrispondenti ad una sollecitazione di 1.25 volte P_3 minore del 2%

ASME NH, ANALISI ELASTICA Nella normativa ASME vengono proposti tre metodi diversi per l'analisi elastica. Di seguito si riportano i limiti per la verifica dei criteri:

- Test No. A-1 : $X + Y \leq \frac{S_a}{S_y}$, dove S_y è definito come il valore medio, tra quello relativo alla temperatura massima e quello relativo alla temperatura minima, della sollecitazione di snervamento ed X e Y sono:

$$X \equiv \frac{P_L + \frac{P_b}{K_t}}{S_y} \quad (7.5)$$

$$Y \equiv \frac{\Delta q}{S_y} \quad (7.6)$$

- Test No. A-2 : $X + Y \leq 1$
- Test No. A-3 : l'insieme dei criteri da verificare per il test A-3 è riportato nel capitolo 6.

ASME NH, ANALISI INELASTICA SEMPLIFICATA

- Test Nos. B-1 e B-2
 1. Determinazione di σ_c ¹
 2. Determinazione della deformazione combinata creep-ratcheting.
La deformazione combinata si determina considerando una sollecitazione equivalente di 1.25 volte σ_c
- Test No. B-3 : Descrizione dettagliata riportata nel capitolo 6

7.1 Primo Caso

Come materiale per il confronto è stato utilizzato l'acciaio di tipo 9Cr-1Mo, le cui caratteristiche sono riportate nell'appendice A3.18AS delle RCC-MRx. Si ipotizza che la geometria sia quella di un vessel sottoposto a pressione interna p e ad un gradiente termico lineare ΔT nello spessore. La temperatura media nella parete sia T_m e il tempo di vita del componente sia t .

Il ciclo di carico comprende due estremi, entrambi alla stessa temperatura media T_m , pari a 400°C, 450°C, 500°C. La pressione induce solo sollecitazioni di membrana P_m . La sollecitazione indotta dal gradiente ΔT è: $\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2 \cdot (1 - \nu)}$. Utilizzando per l'analisi seguenti valori, si ottengono i risultati riportati in tabella 7.1.

$$P_m = 0.8S_m, 0.9S_m, S_m$$

$$T_m = 400^\circ\text{C}, 450^\circ\text{C}, 500^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 60^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}$$

$$t = 1 \cdot 10^5 h, 4 \cdot 10^5 h$$

Per ogni temperatura media T_m , il calcolo viene svolto nelle tre diverse condizioni di carico primario, e per le tre condizioni di gradiente termico. Per

¹Per la determinazione di questo valore si utilizzano i diagrammi di Bree, la procedura è riportata nel capitolo 6

ognuno dei tre casi vengono considerati due tempi. In questo modo si ottengono, per ogni temperatura media, sei valori di $\frac{P_{calcolata}}{P_{limite}}$, al variare della sollecitazione primaria, dell'ampiezza delle sollecitazioni secondarie e del tempo di permanenza del carico.

T_m °C	P_m MPa	Q MPa	t h	ASME							RCC-MRx	
				$3S_m$	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	$1.3S_m$	ϵ_{tot}
400	139.47	101.12	$1 \cdot 10^5$	0.46	0.84	0.71	**	0.015	0.024	**	0.66	0.022
			$4 \cdot 10^5$	0.46	0.84	0.71	**	0.021	0.035	**	0.66	0.033
400	156.91	134.82	$1 \cdot 10^5$	0.56	1.02	0.86	**	0.028	0.043	**	0.77	0.053
			$4 \cdot 10^5$	0.56	1.02	0.86	**	0.042	0.064	**	0.77	0.079
400	174.34	168.54	$1 \cdot 10^5$	0.66	1.20	1.05	**	0.052	0.120	**	0.88	0.120
			$4 \cdot 10^5$	0.66	1.20	1.05	**	0.076	0.180	**	0.88	0.170
450	129.95	101.46	$1 \cdot 10^5$	0.47	0.93	0.72	**	0.065	0.096	**	0.67	0.100
			$4 \cdot 10^5$	0.47	0.93	0.72	**	0.099	0.150	**	0.67	0.160
450	146.20	135.28	$1 \cdot 10^5$	0.58	1.13	0.88	**	0.120	0.200	**	0.79	0.230
			$4 \cdot 10^5$	0.58	1.13	0.88	**	0.200	0.430	**	0.79	0.500
450	162.44	169.10	$1 \cdot 10^5$	0.68	1.33	1.04	**	0.200	0.650	**	0.90	0.560
			$4 \cdot 10^5$	0.68	1.33	1.04	**	0.420	1.940	**	0.90	1.590
500	117.09	102.00	$1 \cdot 10^5$	0.50	1.18	0.75	**	0.320	0.720	**	0.69	0.710
			$4 \cdot 10^5$	0.50	1.18	0.75	**	0.910	2.410	**	0.69	2.350
500	131.72	136.00	$1 \cdot 10^5$	0.61	1.44	0.92	**	0.730	1.930	**	0.81	2.56
			$4 \cdot 10^5$	0.61	1.44	0.92	**	2.430	7.100	**	0.81	9.54
500	146.36	170.00	$1 \cdot 10^5$	0.72	1.70	1.08	**	1.740	10.20	**	0.93	8.40
			$4 \cdot 10^5$	0.72	1.70	1.08	**	6.360	39.90	**	0.93	32.70

Tabella 7.1: Valutazione delle metodologie di calcolo ASME ed RCC-MRx in condizioni di creep significativo. Con le condizioni di carico considerate non si rientra nei domini di applicabilità dei Test Nos. A-3 e B-3.

Come detto i valori in tabella 7.1 sono da intendersi come frazioni del criterio limite del metodo considerato. In generale si nota come:

- Per l'analisi elastica, tra i test ASME A-1 ed A-2, quello più conservativo sia il Test No. A-1;
- Per l'analisi inelastica, tra i test ASME B-1 e B-2, quello più conservativo sia il Test No. B-2;
- I test A-1 ed A-2 siano più conservativi rispetto a B-1 e B-2;
- I risultati del calcolo secondo RCC-MRx siano molto vicini a quelli secondo ASME.

Nello specifico se si confrontano i risultati del **Test ASME B-2** con il **Test RCC-MRx** ϵ_{totale} è possibile notare quanto essi siano confrontabili. Di seguito si riportano dei grafici di confronto alle diverse temperature T_m . Le diverse combinazioni di sollecitazione primaria, sollecitazione secondaria, e tempo di applicazione del carico riportate in tabella 7.1 sono state classificate in condizioni di carico e numerate. È stato poi riportato il valore del rapporto tra i risultati forniti dalle due diverse norme (Tabelle 7.2,7.3,7.4).

T_{mean} °C	P_m	ΔT °C	t h	Condizione di Carico	ASME B-2	RCC-MRx ϵ_{tot}	Rapporto ASME / RCC
400	$0.8S_m$	60	10^5	A1	0.024	0.022	1.091
			$4 \cdot 10^5$	A2	0.035	0.033	1.061
	$0.9S_m$	80	10^5	A3	0.043	0.053	0.811
			$4 \cdot 10^5$	A4	0.064	0.079	0.810
	S_m	100	10^5	A5	0.120	0.120	1.000
			$4 \cdot 10^5$	A6	0.180	0.170	1.059

Tabella 7.2: Tabella di confronto per le condizioni di carico relative ad una T_{mean} pari a 400 °C

In figura 7.2 si riporta una schematizzazione grafica della tabella 7.2. Si nota come il Test ASME B-2 sia leggermente più conservativo per le condizioni di carico ($P_m = 0.8S_m$; $\Delta T = 60$ °C) e ($P_m = S_m$; $\Delta T = 100$ °C) mentre il Test RCC-MRx lo sia per la condizione di carico ($P_m = 0.9S_m$; $\Delta T = 80$ °C).

T_{mean} °C	P_m	ΔT °C	t h	Condizione di Carico	ASME B-2	RCC-MRx ϵ_{tot}	Rapporto ASME / RCC
450	$0.8S_m$	60	10^5	B1	0.096	0.100	0.960
			$4 \cdot 10^5$	B2	0.150	0.160	0.938
	$0.9S_m$	80	10^5	B3	0.200	0.230	0.870
			$4 \cdot 10^5$	B4	0.430	0.500	0.860
	S_m	100	10^5	B5	0.650	0.560	1.161
			$4 \cdot 10^5$	B6	1.940	1.590	1.220

Tabella 7.3: Tabella di confronto per le condizioni di carico relative ad una T_{mean} pari a 450 °C

Dalla tabella 7.3 si nota come in questo caso il Test RCC-MRx sia più conservativo per le condizioni di carico ($P_m = 0.8S_m$; $\Delta T = 60$ °C) e ($P_m =$

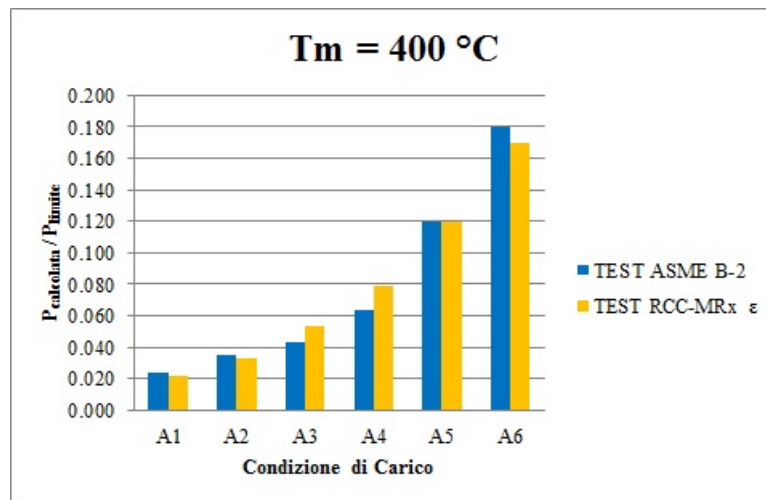


Figura 7.2: In figura sono riportati i valori contenuti in tabella 7.2

$0.9S_m; \Delta T = 80 \text{ °C}$) mentre il Test ASME lo sia per la condizione di carico ($P_m = S_m; \Delta T = 100 \text{ °C}$). Più in generale è possibile notare che, fino alla condizione di carico B5 i due criteri di accettabilità proposti sono verificati, mentre, per la condizione B6 il rapporto $\frac{P_{calcolata}}{P_{limite}}$ è maggiore di 1 e quindi il criterio non è più soddisfatto.

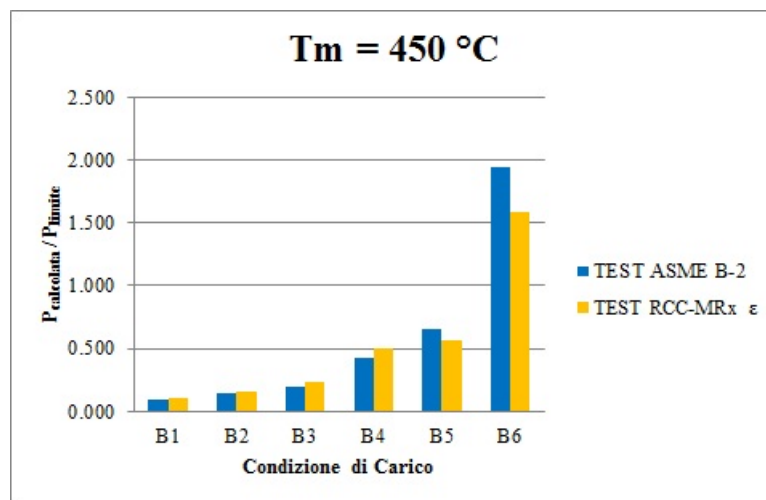


Figura 7.3: In figura sono riportati i valori contenuti in tabella 7.3

Mentre nel caso di T_{mean} pari a 450 °C una sola condizione di carico non verificava i criteri proposti dalle due norme, nel caso di temperatura media

T_{mean} °C	P_m	ΔT °C	t h	Condizione di Carico	ASME B-2	RCC-MRx ϵ_{tot}	Rapporto ASME / RCC
500	$0.8S_m$	60	10^5	C1	0.096	0.100	0.960
			$4 \cdot 10^5$	C2	0.150	0.160	0.938
	$0.9S_m$	80	10^5	C3	0.200	0.230	0.870
			$4 \cdot 10^5$	C4	0.430	0.500	0.860
	S_m	100	10^5	C5	0.650	0.560	1.161
			$4 \cdot 10^5$	C6	1.940	1.590	1.220

Tabella 7.4: Tabella di confronto per le condizioni di carico relative ad una T_{mean} pari a 500 °C

di parete pari a 500°C, l'unica condizione di carico che conduce a valori di sollecitazione primaria effettiva compatibili con i limiti è la condizione C1 relativa alla combinazione ($P_m = 0.8S_m$; $\Delta T = 60^\circ\text{C}$; $t = 10^5$ ore). In tutti gli altri casi i valori ottenuti non rientrano all'interno dei limiti proposti dalle ASME e dalle RCC-MRx. Per quanto riguarda il confronto tra i due metodi, si può notare un maggiore conservativismo del metodo ASME per le condizioni di carico relative a ($P_m = 0.8S_m$; $\Delta T = 60^\circ\text{C}$) e ($P_m = S_m$; $\Delta T = 100^\circ\text{C}$) mentre il metodo RCC-MRx risulta più conservativo per la condizione ($P_m = 0.9S_m$; $\Delta T = 80^\circ\text{C}$).

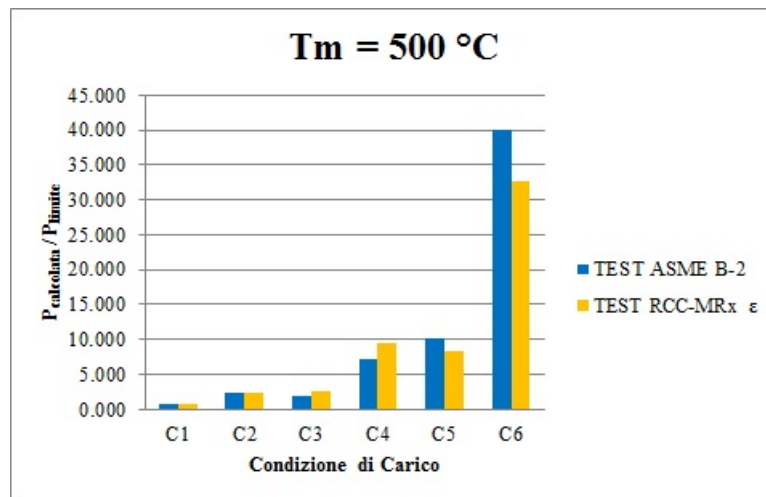


Figura 7.4: In figura sono riportati i valori contenuti in tabella 7.4

Di seguito viene inoltre riportato un grafico riassuntivo del confronto tra i due metodi. In ascissa sono riportate tutte le condizioni di carico considerate,

mentre in ordinata il rapporto tra i risultati dei due metodi.

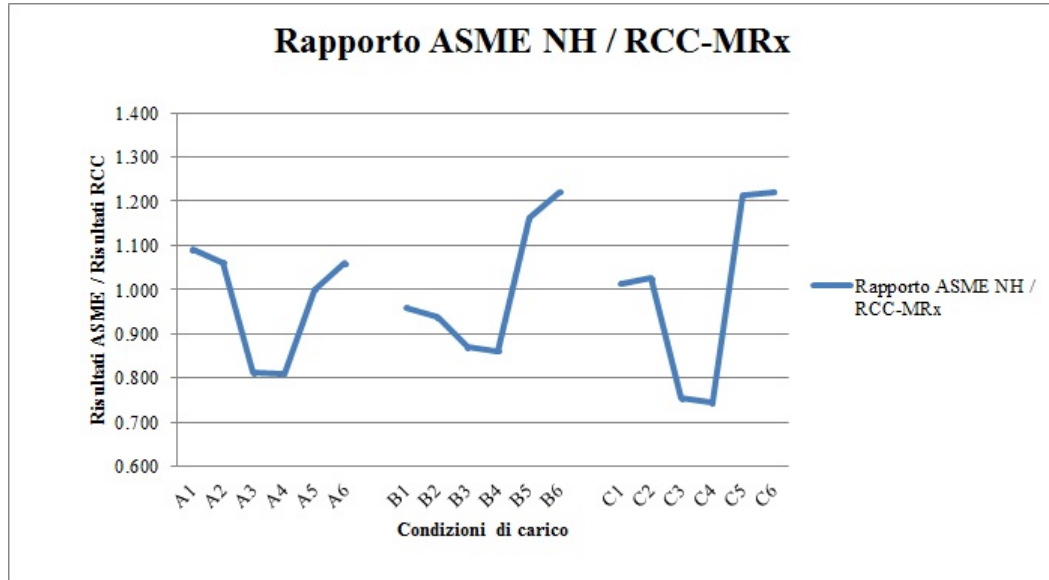


Figura 7.5: Grafico di confronto riassuntivo di tutte le condizioni di carico considerate

7.2 Secondo Caso

Per lo stesso materiale, Acciaio 9Cr-1Mo, e per la stessa geometria, vessel con pressione interna p e gradiente lineare ΔT nello spessore, è stato svolto un secondo confronto tra i vari criteri riportati nelle norme ASME e nelle norme RCC-MRx. In questo caso il ciclo comprende due stati estremi:

- a) $T_{mean} = 20\text{ °C}$; $\Delta T = 0\text{ °C}$
- b) $T_{mean} = 400, 450, 500\text{ °C}$; $\Delta T \neq 0\text{ °C}$

Anche in questo caso si considera come effetto della pressione solo la sollecitazione primaria di membrana P_m . Il gradiente ΔT induce una sollecitazione pari a $\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2 \cdot (1 - \nu)}$. Per l'analisi sono stati utilizzati i seguenti valori:

$$P_m = 0.8S_m, 0.9S_m, S_m$$

$$T_m(b) = 400^{\circ}\text{C} , 450^{\circ}\text{C} , 500^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 60^{\circ}\text{C} , 80^{\circ}\text{C} , 100^{\circ}\text{C}$$

$$t = 1 \cdot 10^5 h, 4 \cdot 10^5 h$$

Ciò che cambia in questo caso è la temperatura media della struttura nell'estremo a del ciclo di carico. L'abbassamento della temperatura media di parete porta a diversi valori dei parametri per la verifica dei criteri. In tabella sono riportati i risultati di questo secondo confronto.

T_m °C	P_m MPa	Q MPa	t h	ASME							RCC-MRx	
				$3S_m$	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	$1.3S_m$	ϵ_{tot}
400	139.47	101.12	$1 \cdot 10^5$	0.46	0.84	0.65	**	0.015	0.027	**	0.59	0.022
			$4 \cdot 10^5$	0.46	0.84	0.65	**	0.021	0.045	**	0.59	0.033
400	156.91	134.82	$1 \cdot 10^5$	0.56	1.02	0.79	**	0.028	0.079	**	0.69	0.053
			$4 \cdot 10^5$	0.56	1.02	0.79	**	0.042	0.12	**	0.69	0.079
400	174.34	168.54	$1 \cdot 10^5$	0.66	1.20	0.93	**	0.052	0.14	**	0.79	0.12
			$4 \cdot 10^5$	0.66	1.20	0.93	**	0.076	0.21	**	0.79	0.17
450	129.95	101.46	$1 \cdot 10^5$	0.47	0.93	0.64	**	0.065	0.14	**	0.58	0.100
			$4 \cdot 10^5$	0.47	0.93	0.64	**	0.099	0.26	**	0.58	0.16
450	146.20	135.28	$1 \cdot 10^5$	0.58	1.13	0.78	**	0.120	0.32	**	0.68	0.23
			$4 \cdot 10^5$	0.58	1.13	0.78	**	0.20	0.78	**	0.68	0.50
450	162.44	169.10	$1 \cdot 10^5$	0.68	1.33	0.92	**	0.20	0.68	**	0.78	0.56
			$4 \cdot 10^5$	0.68	1.33	0.92	**	0.42	2.04	**	0.78	1.59
500	117.09	102.00	$1 \cdot 10^5$	0.50	1.18	0.63	**	0.32	1.16	**	0.56	0.71
			$4 \cdot 10^5$	0.50	1.18	0.63	**	0.91	4.10	**	0.56	2.35
500	131.72	136.00	$1 \cdot 10^5$	0.61	1.44	0.77	**	0.73	2.81	**	0.66	2.56
			$4 \cdot 10^5$	0.61	1.44	0.77	**	2.43	10.5	**	0.66	9.54
500	146.36	170.00	$1 \cdot 10^5$	0.72	1.70	0.91	**	1.66	14.00	**	0.76	8.40
			$4 \cdot 10^5$	0.72	1.70	0.91	**	6.03	55.10	**	0.76	32.70

Tabella 7.5: Valutazione delle metodologie di calcolo ASME ed RCC-MRx in condizioni di creep significativo. Con le condizioni di carico considerate non si rientra nei domini di applicabilità dei Test Nos. A-3 e B-3.

Dalla tabella 7.5 è possibile notare come, pur modificando un parametro fondamentale come la temperatura media di parete T_{mean} , i risultati del calcolo secondo norma RCC-MRx non varino. Questo perché il metodo dipende solo dalla sollecitazione ammissibile e dalle sollecitazioni effettive e nel calcolo non viene considerata la variazione della sollecitazione secondaria con la temperatura media di parete.

Confrontando anche in questo caso i risultati del Test ASME B-2 con quelli del Test RCC-MRx ϵ_{totale} si notano delle differenze rispetto al caso precedente. Nel calcolo secondo ASME la temperatura media di parete influisce sui parametri che permettono di determinare le sollecitazioni X ed Y, rendendo quindi i valori della sollecitazione totale calcolata maggiori rispetto al caso precedente. Nelle seguenti tabelle 7.6, 7.7, 7.8 viene riportato questo confronto al variare di $T_{mean}(b)$. In figura 7.6 si riporta la schematizzazione grafica

T_{mean} °C	P_m	ΔT °C	t h	Condizione di Carico	ASME B-2	RCC-MRx ϵ_{tot}	Rapporto ASME / RCC
400	$0.8S_m$	60	10^5	D1	0.027	0.022	1.227
			$4 \cdot 10^5$	D2	0.045	0.033	1.364
	$0.9S_m$	80	10^5	D3	0.079	0.053	1.491
			$4 \cdot 10^5$	D4	0.120	0.079	1.519
	S_m	100	10^5	D5	0.140	0.120	1.167
			$4 \cdot 10^5$	D6	0.210	0.170	1.235

Tabella 7.6: Tabella di confronto per le condizioni di carico relative ad una $T_{mean}(b)$ pari a 400 °C

della tabella 7.6. In questo caso il Test ASME è sempre più conservativo del Test RCC-MRx, per ogni condizione di carico D.

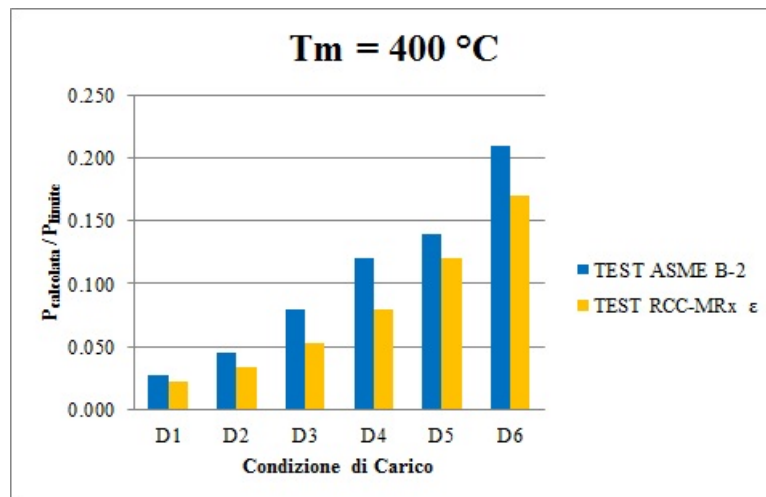


Figura 7.6: In figura sono riportati i valori contenuti in tabella 7.6

In figura 7.7 si riporta la schematizzazione grafica della tabella 7.7. Anche in questo caso il Test ASME è sempre più conservativo del Test RCC-MRx.

T_{mean} °C	P_m	ΔT °C	t h	Condizione di Carico	ASME B-2	RCC-MRx ϵ_{tot}	Rapporto ASME / RCC
450	$0.8S_m$	60	10^5	E1	0.140	0.100	1.400
			$4 \cdot 10^5$	E2	0.260	0.160	1.625
	$0.9S_m$	80	10^5	E3	0.320	0.230	1.391
			$4 \cdot 10^5$	E4	0.780	0.500	1.560
	S_m	100	10^5	E5	0.680	0.560	1.167
			$4 \cdot 10^5$	E6	2.040	1.590	1.283

Tabella 7.7: Tabella di confronto per le condizioni di carico relative ad una $T_{mean}(b)$ pari a 450 °C

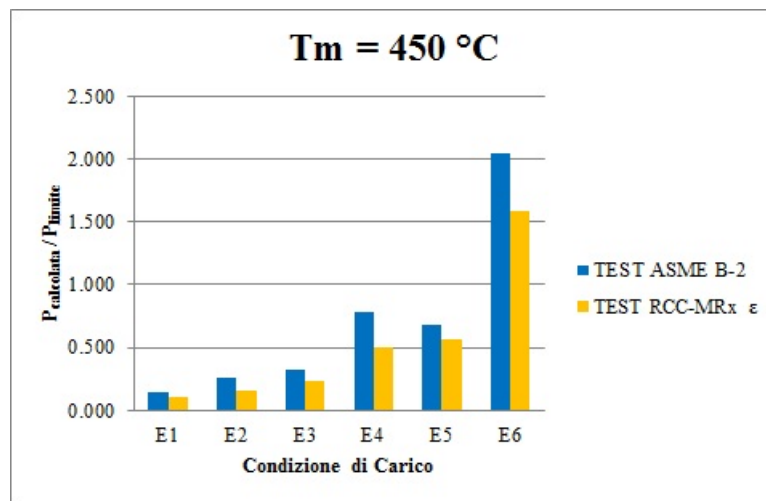


Figura 7.7: In figura sono riportati i valori contenuti in tabella 7.7

T_{mean} °C	P_m	ΔT °C	t h	Condizione di Carico	ASME B-2	RCC-MRx ϵ_{tot}	Rapporto ASME / RCC
500	$0.8S_m$	60	10^5	F1	1.160	0.710	1.634
			$4 \cdot 10^5$	F2	4.100	2.350	1.745
	$0.9S_m$	80	10^5	F3	2.810	2.560	1.0.98
			$4 \cdot 10^5$	F4	10.500	9.540	1.101
	S_m	100	10^5	F5	14.00	8.40	1.667
			$4 \cdot 10^5$	F6	55.10	32.70	1.685

Tabella 7.8: Tabella di confronto per le condizioni di carico relative ad una $T_{mean}(b)$ pari a 500 °C

Per una temperatura media di parete $T_{mean}(b)$ pari a 500°C il Tesm ASME si presenta comunque più conservativo rispetto a quello RCC (Figura 7.8).

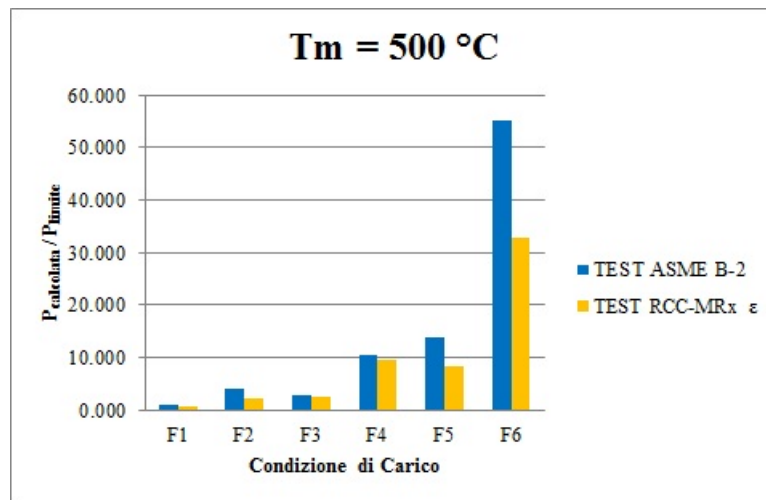


Figura 7.8: In figura sono riportati i valori contenuti in tabella 7.8

In figura è riportato il grafico riassuntivo del confronto tra il criterio ASME ed il criterio RCC-MRx.

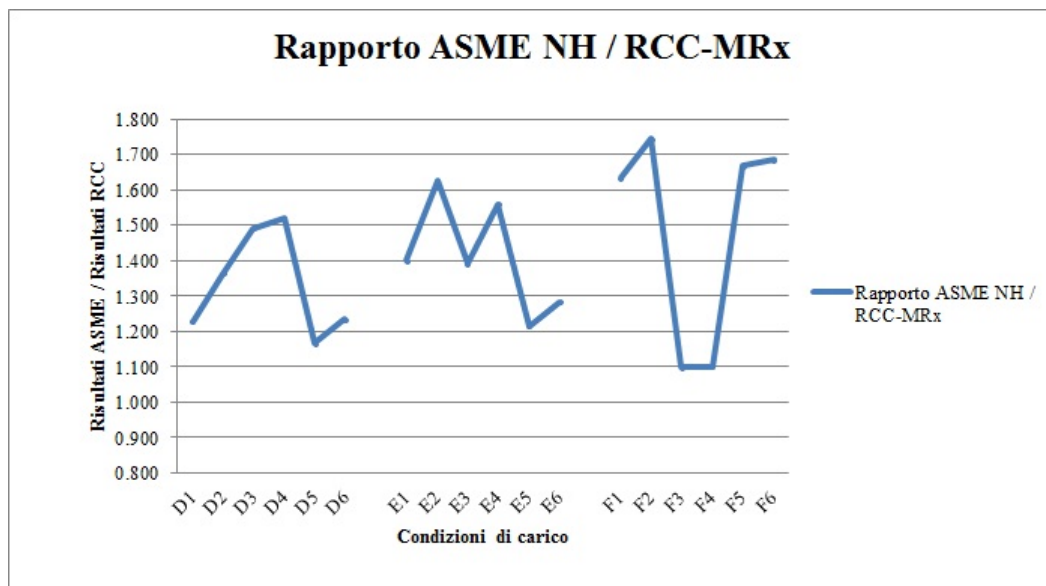


Figura 7.9: Grafico di confronto riassuntivo di tutte le condizioni di carico considerate

In figura 7.10 si riporta invece un confronto tra i due casi che sono stati esaminati. Si nota come il metodo ASME sia in generale più conservativo rispetto al metodo RCC-MRx.

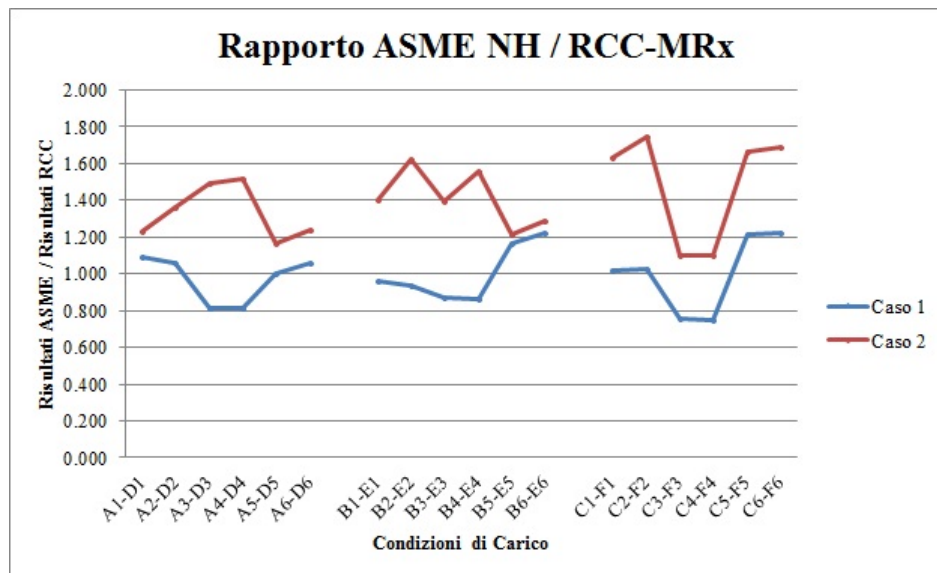


Figura 7.10: Grafico di confronto riassuntivo di tutte le condizioni di carico considerate

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 018	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 99/99
--	---	------------------	----------------------	-------------------------

Bibliografia

- [1] Afcen (Dic. 2010), *Draft 2010 RCC-MRx, Design and Construction Rules for mechanical components of nuclear installation.*
- [2] ITER Department (2010), *ITER Codes and Standards.*
- [3] Yu Yang e M.T. Cabrillat (2005), *Comparison of ratcheting analysis methods using RCC-M, RCC-MR and ASME Codes.*
- [4] ASME (1998), *The 1998 ASME Boiler and Pressure Vessel Code .*
- [5] R. Palengat (2009), *Nuclear Pressur Equipment, RCC-M Code.*
- [6] P. Malouines (2008), *ASME Code for implementation in EPR.*