

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

CORSO DI LAUREA

INGEGNERIA CHIMICA E DI PROCESSO (8896)

TESI DI LAUREA

in

Costruzione di Apparecchiature Chimiche M

ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI E FITNESS FOR SERVICE DI UNA COLONNA DI STRIPPING

CANDIDATO:

Niccolò Reale

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. Piero Morelli

CORRELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. Valerio Cozzani

Anno accademico 2023/2024 Sessione VI

"Erigentes nos ardentiore affectu in id ipsum perambulavimus gradatim cuncta corporalia et ipsum caelum, unde sol et luna et stellae lucent super terram.

Et adhuc ascendebamus interius cogitando et loquendo et mirando opera tua, et venimus in mentes nostras et transcendimus eas, ut attingeremus regionem ubertatis indeficientis.

> *Et dum loquimur et inhiamus illi, attingimus eam modice toto ictu cordis"*

Sancti Augustini, Confessionum liber nonus, IX, 10, 23-24.

RIASSUNTO

La tesi, frutto del tirocinio svolto presso l'azienda Saipex s.r.l., si propone di valutare l'integrità strutturale di una colonna di stripping deformata localmente.

L'apparecchiatura in questione viene utilizzata per la rimozione di idrogeno solforato da una corrente di esano/eptano in un impianto chimico dedicato alla separazione delle paraffine lineari da quelle ramificate presenti nell'alimentazione di kerosene.

La colonna, in funzione dal 1974, è costituita da un guscio cilindrico ad asse verticale con corpi di riempimento in metallo (pall rings), sui quali avviene lo scambio di materia grazie alla creazione di un film di liquido sulla loro superficie.

Durante la fase di fermo impianto e lavaggio della colonna con vapor d'acqua a bassa pressione (3 bar), si è probabilmente verificata una reazione esotermica tra i depositi di solfuro di ferro e l'ossigeno, con un conseguente incremento locale della temperatura fino a circa 800°C. Questo fenomeno ha provocato una deformazione geometrica nella IV virola della colonna, la quale ha riportato una bugna con rigonfiamento interno di circa 25 mm.

Dopo aver esaminato la documentazione fornita dal cliente per valutare le condizioni della colonna, è stata eseguita un'analisi Fitness for Service (FFS) di III livello secondo lo standard API 579, che prevede una valutazione agli elementi finiti (FEM) per determinare l'operabilità della colonna. Realizzato quindi il modello tridimensionale, generata la mesh e definite le condizioni al contorno, è stata condotta un'analisi elasto-perfettamente plastica tenendo conto delle proprietà meccaniche alterate del metallo a causa dell'ingrossamento dei grani rilevato dall'analisi metallografica.

I risultati ottenuti dimostrano che lo stato attuale della virola garantisce l'integrità della colonna senza comprometterne la sicurezza. Tuttavia, considerando le condizioni del materiale e le possibili evoluzioni del degrado, si consiglia di effettuare un monitoraggio a distanza di due anni dall'ultimo controllo, al fine di garantirne l'esercizio.

INDICE

CAPITOLO 1: DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI ADSORBIMENTO	10
1.1 Processo di adsorbimento	10
1.2 Adsorbenti industriali	11
1.3 Parametri principali del processo di adsorbimento	13
1.3.1 Temperatura	13
1.3.2 Pressione	14
1.3.3 Potenzialità dei setacci molecolari	14
1.4 Rigenerazione del setaccio molecolare	15
1.5 Frazionamento delle n-paraffine	17
CAPITOLO 2: DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO	18
2.1 Process Flow Diagram - PFD	18
2.1.1 Circuito desorbente	22
2.1.2 Rigenerazione dei setacci molecolari	24
2.2 Piping & Instrument Diagram – P&ID	27
2.2.1 Colonna di stripping C-206	27
2.2.2 Colonna di abbattimento C-204	28
2.3.2 Colonna di distillazione C-284	29
CAPITOLO 3: DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI STRIPPING	33
3.1 Introduzione	33
3.2 Funzionamento della colonna di Stripping C-206	35
3.3. Tipologie dei corpi di riempimento	38
3.3.1 Random	38
3.3.2 Riempimenti strutturati	39
3.4 Geometria dei supporti degli anelli di Pall Rings	41
CAPITOLO 4: GEOMETRIA DELLA COLONNA C-206	45
4.1 Specifiche di progetto	45

4.2 Materiale	45
4.3 Disegno di assieme	46
CAPITOLO 5: PROCEDURE DI LAVAGGIO E BONIFICA DELLA COLONNA C-206	50
5.1 Lavaggio in fase gassosa	50
5.2 Lavaggio in fase liquida	50
5.2.1 Attività preliminari	52
5.2.2 Procedura e schema di ricircolo	52
CAPITOLO 6: CARATTERIZZAZIONE DEI DIFETTI	55
6.1 Introduzione agli standard API	55
6.2 API 653: Ispezioni visive	55
6.2.1 Ispezioni esterne	56
6.2.1.1 Mantello e fondi ellittici	56
6.2.1.2 Connessioni	58
6.2.2 Ispezioni interne	60
6.2.2.1 Mantello e fondi ellittici	60
6.2.2.2 Connessioni	61
6.2.2.3 Distributore a canale	61
6.2.2.4 Griglia di supporto e trave	62
6.3 Prove spessimetriche	64
6.4 API 571: Meccanismi di danneggiamento	66
6.4.1 Corrosione da alta temperatura da Zolfo (DM1)	68
6.4.2 Wet H₂S (DM2)	69
6.4.3 Corrosione sottocoibente (DM46)	70
6.4.4 Corrosione atmosferica (DM7)	71
6.4.5 Incendio interno	72
6.5 API 579: Fitness for Service	74
6.5.1 API 579 – 11: Valutazione del danneggiamento da incendio	75

6.5.2 API 591 - Annex 11.1B: Analisi metallurgica e valutazione dell'alterazione delle proprie	
meccaniche	80
6.5.2.1 Esame metallografico mediante replica	82
6.6 Analisi della deformazione con scanner 3D	91
6.7 Controllo difettoscopico delle giunzioni con Phased Array UT	95
6.8 Scanner 3D per la verifica della verticalità e della deformazione locale della IV virola	_ 102
CAPITOLO 7: ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI	_ 143
7.1 Proprietà del materiale	143
7.2 Modello tridimensionale	146
7.3 Mesh	151
7.4 Analisi dei carichi e dei vincoli	153
7.4.1 Peso della struttura	153
7.4.2 Pressure thrust	156
7.4.3 Pressione	157
7.4.4 Remote displacement	157
7.5 Analisi dei risultati e post process	159
7.5.1 Spostamenti	159
7.5.2 Tensioni	160
7.5.3 Deformazioni	_ 162
CAPITOLO 8: ANALISI DELLA VITA RESIDUA	_ 163
CAPITOLO 9: CONCLUSIONI E OSSERVAZIONI	_ 166
BIBLIOGRAFIA	167

CAPITOLO 1: DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI ADSORBIMENTO

La sezione di impianto analizzata in questo studio adotta il processo ISOVIL, finalizzato alla separazione delle paraffine lineari da quelle ramificate e dagli idrocarburi ciclici (cicloalcani) presenti nei tagli petroliferi C9-C14 del kerosene. Il processo avviene immettendo la carica in una serie di adsorbitori, dove specifici setacci molecolari trattengono le n-paraffine, consentendo il rilascio degli isomeri.

1.1 Processo di adsorbimento

L'adsorbimento è un fenomeno chimico-fisico che ha luogo quando molecole in fase gassosa o liquida vengono poste in contatto con una superficie solida. Alcune sostanze tendono a legarsi chimicamente o fisicamente col materiale adsorbente, producendo così una selezione dei composti presenti all'interno di una miscela. La capacità dell'adsorbente di trattenere o rilasciare determinate molecole è funzione di diversi fattori e, in particolare:

- Natura dell'adsorbente: composizione chimica, area superficiale e grado di attivazione;
- Natura della sostanza da adsorbire: proprietà come punto di ebollizione, peso molecolare, struttura della molecola, grado di polarità;
- Temperatura del sistema: più alta è la temperatura e minore è la quantità di molecole che possono essere adsorbite;
- Concentrazione delle molecole da adsorbire o pressione parziale nei casi di adsorbimento di fasi gassose: più elevati sono tali parametri, maggiore è la quantità di molecole adsorbite.

Il meccanismo di adsorbimento prevede inoltre le seguenti fasi:

- Trasporto delle molecole dal bulk della corrispettiva fase fino alla superficie esterna della particella adsorbente;
- 2) Trasporto delle molecole dalla superficie esterna all'interno dei pori;
- 3) Adsorbimento delle molecole sulla superficie interna dei pori.

Una volta ottenuta la separazione delle molecole di isomeri dalle paraffine, il processo procede alla fase di rigenerazione per allontanare i composti adsorbiti. Per favorire il desorbimento si possono modificare le condizioni del sistema, come incrementare la temperatura e/o diminuire la pressione, oppure effettuare flussaggi con desorbenti. Nel nostro caso è stata utilizzata una miscela di desorbente contenente esano/eptano in rapporto variabile 20/80.

Il sistema procede così con gli ultimi tre passaggi:

- 4) Desorbimento dalla superficie dell'adsorbente ad opera della miscela desorbente;
- 5) Trasporto delle molecole dall'interno della particella alla superficie esterna;
- Trasporto dalla superficie esterna al bulk della miscela desorbente e allontanamento delle n-paraffine.

In particolar modo, gli adsorbenti industriali che hanno un'elevata area superficiale interna possono facilitare la separazione.

1.2 Adsorbenti industriali

Le tipologie di adsorbenti più utilizzati nell'industria chimica sono:

- Carbone attivo: adoperato soprattutto per la purificazione di aria e acqua, possiede una superficie porosa estremamente elevata;
- Allumine attivate: composte principalmente da ossido di alluminio (Al₂O₃) sono prodotte mediante trattamento termico per l'ottenimento di una struttura cristallina porosa;
- Silice Gel: materiale poroso utilizzato prevalentemente per la disidratazione di una fase gassosa in quanto rimuove le molecole di acqua deumidificando la corrente;
- Setacci molecolari: alluminosilicati che hanno la peculiarità di essere costituiti da porosità controllata tramite processo idrotermale. Le zeoliti rappresentano una loro classe che si distingue per elevata selettività rispetto al carbone attivo e alla silice.

Poiché le prime tre tipologie di materiali presentano strutture cristalline amorfe, si preferiscono utilizzare setacci molecolari, i quali possiedono non solo determinate dimensioni dei pori comprese tra i 3 e i 10 Å, ma anche un'area superficiale maggiore di 700 m²/g a fronte dei 300÷350 m²/g delle geometrie amorfe.

La formula chimica del setaccio industriale più importante è la seguente:

Na₁₂(AlO₂)₁₂(SiO₂)₁₂ · 27 H₂O

Si tratta di una struttura tridimensionale composta da tetraedri di SiO₂ e AlO₄ legati tra loro mediante atomi di ossigeno. In questo modo si ottiene un cristallo formato da grandi cavità interne comunicanti tra loro e con l'esterno mediante aperture o canali, detti appunto pori. Il processo ISOVIL in questione utilizza dimensioni di 5 Å all'interno di letti contenuti in apposite "colonne".

Si deve tenere in considerazione però che nel tempo le capacità di adsorbimento del setaccio molecolare diminuiscono a causa della sua saturazione di n-paraffine. Per questo è necessario, con cicli programmati, effettuare una rigenerazione completa del letto adsorbente utilizzando una miscela di esano/eptano chiamata genericamente desorbente. Dal momento che l'innalzamento di temperatura all'interno del letto accresce la tendenza alla polimerizzazione, al cracking e ad altre reazioni che comportano la produzione di coke, la rigenerazione serve quindi per garantire il corretto ripristino delle condizioni operative ed evitare così il deposito di coke che disattiva la capacità di adsorbimento. La velocità di formazione di tale strato carbonioso dipende dalla temperatura operativa, dal peso molecolare e dal contenuto di zolfo nella carica: tanto maggiori sono questi parametri quanto più alta è la velocità di invecchiamento.

Per eliminare il coke viene quindi effettuata una combustione mediante innalzamento della temperatura in presenza di O₂. Al fine di mantenere operativo l'impianto, dei cinque reattori di adsorbimento presenti, se ne esclude uno per volta mentre gli altri si mantengono in adsorbimento; in questo modo, a rotazione, viene effettuata la rigenerazione di tutti i reattori.

1.3 Parametri principali del processo di adsorbimento

1.3.1 Temperatura

Per trattenere le molecole lineari di n-paraffine sui setacci si dovrebbe utilizzare una temperatura inferiore a 300°C. Aumentando questo valore diminuisce infatti la selettività comportando anche l'adsorbimento di isomeri. Inoltre, se aumenta la quantità di calore fornito diventano significativi i fenomeni di cracking, che sono certamente indesiderati. Tuttavia, a basse temperature, in funzione della composizione e della pressione della carica, può avvenire una condensazione delle molecole all'interno dei setacci che diminuisce la selettività dell'adsorbimento.

Tenendo in considerazione questi molteplici fattori, il processo opera ad una temperatura inferiore a 370 °C. Infatti, da evidenze sperimentali, è stato possibile osservare che la temperatura operativa, risultato dell'ottimizzazione della selettività, si raggiunge impostando la seguente formula:

-
$$T_{op} = T_{DP} + 10^{\circ}C$$
 [Equazione 1.3.1.1]

Dove T_{DP} indica la temperatura di rugiada calcolata ad una pressione doppia rispetto alla pressione operativa. Tale valore è stimato in funzione della curva di distillazione secondo norma ASTM D86 che ci consente di ottenere una correlazione più precisa:

-
$$T_{op} = \frac{T_{ASTM 50\%} + T_{ASTM 95\%}}{2} + 50(1 + \ln P_{ads}) + 10^{\circ}C$$
 [Equazione 1.3.1.2]

Dove:

T_{ASTM} 50%: temperatura a 50% della curva di distillazione del kerosene; T_{ASTM} 95%: temperatura a 95% della curva di distillazione del kerosene P_{ads}: pressione assoluta del circuito di adsorbimento (ingresso adsorbitori)

1.3.2 Pressione

Il processo di adsorbimento/desorbimento è favorito dalle basse pressioni. Ciò consente di contenere la quantità di desorbente da utilizzare e quindi i relativi costi energetici connessi alla distillazione successiva della miscela. Tuttavia, questo parametro deve essere sufficientemente alto da garantire una pressione positiva sulle teste delle colonne di distillazione desorbente.

Per evitare poi inquinamenti dovuti a eventuali trafilamenti dalle valvole di processo, si mantiene sempre una pressione superiore nel circuito desorbente rispetto a quello di carica. Il campo di oscillazione della pressione di esercizio è 0.7÷1.4 kg/cm².

1.3.3 Potenzialità dei setacci molecolari

La quantità di n-Paraffine che può essere estratta dai setacci viene espressa mediante un parametro denominato delta loading (ΔW) che rappresenta la quantità, espressa in kg, di n-paraffina desorbita per 100 kg di setacci. Tale parametro è funzione di:

- PM: peso molecolare delle n-paraffine in carica;
- λ: desorbente usato (kmol desorb. / 100 kg di setacci);
- S: ppm di zolfo presente nella carica;
- TNP: percentuale in peso delle n-Paraffine contenute nella carica;
- TIA: tempo di assorbimento in minuti (incluso tempi inerzia valvole). Si calcola moltiplicando il tempo di co-purga per il numero di reattore in assorbimento;
- TID: tempo di desorbimento in minuti (incluso tempi inerzia valvole). Si calcola moltiplicando il tempo di co-purga per il numero di reattore in desorbimento;
- TEA: temperatura ingresso assorbitori espressa in K;
- DPE: dimensioni dei pellet del setaccio (espresse in pollici);
- OPT: giorni di marcia dall' ultima rigenerazione;
- DR: velocità di disattivazione setacci espressa in %/giorno;

Questi fattori consentono di poter esprimere la seguente formula:

$$\Delta W = \frac{(8 + \frac{TNP}{100}) \cdot (1 - 0TP \cdot \frac{DR}{100})}{B + 1 + \frac{1}{18 \cdot \lambda} \cdot \frac{TNP}{100}} \cdot 1.25 \qquad [Equation e 1.3.3.1]$$

$$DR = (1 + \frac{S}{500}) \cdot 10^{9 - \frac{5600}{TEA}} \qquad [Equation e 1.3.3.2]$$

$$B = \frac{\left(\frac{MW}{100}\right)^4}{(1 + 3\lambda) \cdot \frac{1}{0.4} + \frac{0.6}{TID}} \cdot (10^{\frac{875}{TEA} - 1.5} + 25 \cdot DPE^2 + (1 + \frac{S}{500}) \cdot 10^{7.4 - \frac{5600}{TEA}}$$

[Equazione 1.3.3]

A causa della progressiva disattivazione dei setacci, il ΔW tende a diminuire con il tempo (a parità degli parametri). Pertanto, quando il delta loading raggiunge valori molto bassi, è necessario eseguire una rigenerazione in situ dei setacci.

1.4 Rigenerazione del setaccio molecolare

Durante il normale funzionamento del processo di estrazione delle n-paraffine da kerosene si osserva una progressiva disattivazione dei setacci, per cui viene richiesta una fase di rigenerazione. La disattivazione dell'adsorbente è il risultato dell'accumulo di materiale carbonioso sul setaccio stesso.

La graduale formazione del deposito carbonioso è un fenomeno complesso che si sviluppa mediante diversi stadi. Ad esempio, le molecole di n-paraffine adsorbite dai setacci, esposte ad elevate temperature, possono isomerizzare o subire un cracking a olefine. Gli isomeri, avendo dimensioni superiori alle molecole lineari da cui provengono, rimangono bloccati all'interno delle cavità cristalline riducendo in tal modo il volume e la capacità di adsorbimento. Inoltre, possono subire ulteriori reazioni di cracking; infatti, l'olefina, essendo fortemente adsorbita, tende a fissarsi e a rimanere nella cavità adsorbente che, in funzione della temperatura, polimerizza o ciclizza a composto aromatico perdendo ulteriormente idrogeno e lasciando nelle cavità dei cristalli un deposito carbonioso.

Il materiale accumulato riduce progressivamente il volume selettivo dei pori diminuendo le prestazioni del processo a causa di un basso recupero e di una riduzione della purezza.

La frequenza di rigenerazione è funzione di numerosi fattori, tra cui i più importanti sono: la carica (peso molecolare, livello di zolfo), le condizioni operative (temperatura del processo di estrazione), i setacci molecolari (vita attiva nel ciclo produttivo).

Raggiunto poi il fine vita dei setacci è comunque necessaria una rigenerazione per rimuovere inquinanti residui e prevenire fenomeni esotermici a contatto con l'aria.

La rigenerazione consiste in una operazione di combustione controllata dei residui organici presenti sui setacci di un reattore il quale, dopo essere stato completamente isolato dal ciclo produttivo, viene inserito in un apposito circuito.

Le fasi che caratterizzano la rigenerazione per ogni adsorbitore sono:

- 1) Purga con desorbente dall'alto verso il basso del reattore per recuperare le n-paraffine;
- Riscaldamento in flusso di azoto per rimuovere il desorbente e portare la temperatura del letto dei setacci sopra il punto di ignizione del deposito carbonioso (400 °C);
- 3) Burn-off del deposito carbonioso introducendo nel reattore, dall'alto verso il basso, un flusso di azoto e aria (fino a un contenuto di O₂ pari a 1% in volume). L'ossigeno brucia il deposito e forma un fronte caldo che oscilla tra 490÷510°C e progredisce lungo il reattore. Al successivo passaggio del fronte termico, la temperatura scende fino al valore dei flussi in ingresso (questa fase si ritiene completata quando il fronte di temperatura attraversa tutto il letto, per ritornare a circa 400°C). I fumi di rigenerazione ottenuti vengono inviati al forno per la loro combustione;
- Post purga con azoto in modo da rimuovere ogni traccia di ossigeno e raffreddamento del reattore alla temperatura di 330 °C;
- 5) Prelavaggio con desorbente: il letto di setacci contenente azoto viene depressurizzato a blow-down e successivamente messo in lavaggio con desorbente in fase vapore in modo da poter essere inserito nel ciclo di adsorbimento.

In caso di previsto scarico di setacci per la sostituzione, si procede alla fase di raffreddamento fino a 45 °C tramite azoto dopo il punto 4.

1.5 Frazionamento delle n-paraffine

Il frazionamento delle n-paraffine è una lavorazione che viene effettuata previa desolforazione della carica. Tale processo consente di separare la miscela totale in vari tagli utilizzabili nei processi a valle o destinati a vendita.

La sezione del frazionamento comprende colonne di distillazione poste in serie, ognuna delle quali permette la produzione di uno o più tagli consecutivi. La configurazione ottimale del frazionamento di n-paraffine è quella relativa alla produzione di cariche costituite dall'insieme di due paraffine successive in modo tale che due di queste adiacenti abbiano una paraffina in comune. Con tale configurazione è infatti possibile rispettare qualsiasi richiesta di formulazione, sia interna che esterna.

Un possibile assetto del treno delle colonne di distillazione è riportato nella tabella sottostante:

COLONNA	TAGLIO DI TESTA
C-282	C ₁₀ -C ₁₁
C-1282	C ₁₁ -C ₁₂
C-1286	C ₁₂ -C ₁₃
C-1285	C ₁₃ -C ₁₄
C-283	C ₁₄ -C ₁₅

Tabella 1: esempio di frazioni paraffiniche

Tutte le colonne di frazionamento funzionano in sottovuoto utilizzando una coppia di eiettori che abbassano la pressione nel collettore al quale sono collegati ricevitori di riflusso delle colonne. In questo modo si possono abbassare le temperature di ebollizione dei vari componenti della miscela da frazionare, potendo così utilizzare ribollitori a olio diatermico con temperature inferiori ai 320°C riducendo i fenomeni di cracking delle n-paraffine.

Il sistema di frazionamento è stato progettato per lavorare con un sottovuoto spinto con pressione di progetto pari al vuoto assoluto. Per quanto riguarda la temperatura nell'accumulatore di riflusso deve essere scelta in maniera tale da consentire il minimo trascinamento possibile di idrocarburi all'eiettore.

CAPITOLO 2: DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO

2.1 Process Flow Diagram - PFD

Il sito è costituito da due impianti gemelli che lavorano esattamente allo stesso modo ma con una portata di kerosene diversa. L'impianto "Kerosene-01" lavora con una carica di 90 ton/h, mentre il "Kerosene-02" con 50 ton/h. Questo è dovuto al dimensionamento delle singole attrezzature che consentono di trattare più o meno quantitativo di miscela. Inoltre, nel caso in cui uno dei due complessi necessiti di fermo impianto, la produzione è comunque garantita dalla sezione parallela.

Poiché la colonna C-206 che ha subito deformazione è situata nell'impianto "Kerosene-02" si prende in considerazione soltanto tale sezione, considerando che, nel caso gemello, si ha comunque il medesimo processo.

La portata di carico normale è 50 ton/h di kerosene, derivante dalle massime condizioni di carico idraulico definite dal dimensionamento meccanico delle attrezzature. Valori inferiori definiscono transitori di avviamento o fermata.

Nel Process Flow Diagram della pagina successiva si può osservare che il kerosene di carica proveniente dalla sezione di pre-frazionamento a circa 60-80°C viene inviato allo scambiatore di calore a fascio tubiero E-216 B/C e successivamente al polmone di carica V-205. La pressione di tale serbatoio è mantenuta leggermente positiva tramite una linea di polmonazione collegata al collettore del blow-down.

Le pompe di rilancio P-210 A/B prelevano la corrente dal V-205 e innalzano la pressione a circa 10 barg, inviando poi la miscela agli scambiatori carica/effluente E-221 A/B. In tali scambiatori il fluido di processo viene riscaldato fino a circa 230 °C e, ancora allo stato liquido, viene successivamente inviato al forno F-204 che provvede a vaporizzarlo. Il fluido è poi surriscaldato fino alla temperatura di 315 ÷ 330 °C in modo tale da mantenersi al di sopra della temperatura di condensazione capillare. La pressione in uscita al forno ha un valore di circa 1 barg.

La carica, allo stato di vapore surriscaldato, viene inviata in due dei cinque assorbitori R-205 ÷ R-209, attraverso le relative valvole collegate con i collettori di fondo. Le n-paraffine presenti nella carica vengono adsorbite nei setacci molecolari mentre gli altri componenti non-normali (chiamati per comodità isomeri, sebbene contengano anche composti ciclici) attraversano il letto e proseguono verso la successiva apparecchiatura. Tale flusso, che confluisce insieme all'uscita del reattore di co-purga al collettore denominato "combined effluent", contiene anche il desorbente spiazzato. Il collettore della carica e quello del combined sono quindi collegati tramite un by-pass provvisto di valvola automatica (PCV-207) che permette di avere la continuità del circuito quando i reattori vengono intercettati per cause di blocco o per le fasi transitorie di avviamento o di fermata impianto.

La corrente 7, ossia il combined effluent, viene poi raffreddata e parzialmente condensata a 175°C negli scambiatori di calore E-221 A/B (lato tubi) tramite il calore proveniente dalla carica dell'impianto. L'uscita dagli scambiatori viene inviata nel separatore V-222 in cui avviene la separazione del liquido e del vapore.

La parte liquida del V-222 viene alimentata al piatto 44 della C-221 tramite la pompa P-222, mentre la fase vapore viene alimentata sotto il piatto 45. Questa apparecchiatura ha lo scopo di separare dalla testa il desorbente contenuto nel combined effluent, mentre dal fondo viene ricavato il kerosene isomero. La conduzione della colonna deve essere tale da consentire una corrente di desorbente esente da pesanti e isomero esente da desorbente. Tale risultato può essere ottenuto variando opportunamente il calore di fondo e il riflusso di testa colonna.

Il desorbente esce dalla testa colonna C-221 allo stato vapore e una sua frazione viene inviata alla colonna C-206 (stripper H₂S) alla temperatura di circa 70 °C. In questo modo si stabilisce un flusso di vapore tale da fornire la quantità necessaria di calore alla corrente di desorbente proveniente da V-203 al fine di eliminare tutto l'idrogeno solforato (H₂S). I vapori rimanenti vengono uniti a quelli provenienti dall'uscita della testa di C-206 e sono quindi inviati nei condensatori ad aria E-224. Effettuata la condensazione e il sottoraffreddamento fino alla temperatura di circa 30°C vengono dunque inviati al V-203. Questo serbatoio di stoccaggio accumula il desorbente contenente H₂S proveniente dalle teste delle colonne e viene eliminato attraverso il sistema vent gas verso il blow down.

La frazione maggiore del prodotto di fondo C-221, aspirato dalla pompa P-223, viene inviata nel forno ribollitore F-223, mentre la restante parte è convogliata agli scambiatori E-205 A/B, il cui calore utilizzato proviene dal desorbente totale dal fondo della colonna C-206. L'uscita da E-205 alla temperatura di circa 100°C viene inviata nel refrigerante ad aria E-225 dove, alla temperatura di circa 30 °C, viene stoccata presso i serbatoi di isomeri attraverso la corrente 55.





2.1.1 Circuito desorbente

Il rapporto desorbente/paraffine utilizzato negli assorbitori è in generale costante, a parità di aging dei setacci. Si è a conoscenza del fatto che con TNP pari al 20%, percentuale in peso riferita alle n-paraffine contenute all'interno della carica, tale rapporto varia da 8 a 14 ton/ton:

$$R = \frac{Q_{desorb.}}{Q_{paraf.}} = 8 \div 14$$
[Equazione 2.1.1.1]

Nel nostro caso, avendo circa 50 ton/h di kerosene, $Q_{paraf.} = 0.2 \cdot 50 = 10$ ton/h. Di conseguenza, avendo R variabile tra 8 e 14 ton/ton si ottiene:

- $Q_{desorb., min} = Q_{paraf.} \cdot R_{min} = 10 \cdot 8 = 80 \text{ ton/h}$ [Equazione 2.1.1.2]- $Q_{desorb., max} = Q_{paraf.} \cdot R_{max} = 10 \cdot 14 = 140 \text{ ton/h}$ [Equazione 2.1.1.3]

Per similitudine, avendo TNP riferito alla corrente 1 di kerosene pari a 60% si ottiene, come in precedenza, una portata paraffinica $Q_{paraf.} = 0.6 \cdot 50 = 30$ ton/h. Così, il desorbente varietà tra:

-	$Q_{desorb., min} = Q_{paraf.} \cdot R_{min} = 30 \cdot 8 = 240 \text{ ton/h}$	[Equazione 2.1.1.4]
-	$Q_{desorb., max} = Q_{paraf.} \cdot R_{max} = 30 \cdot 14 = 420 \text{ ton/h}$	[Equazione 2.1.1.5]

Portate inferiori ai corrispettivi valori minimi sono possibili durante le fasi di avviamento e fermata della sezione.

L'accumulatore del desorbente è il V-203 che viene mantenuto alla pressione di blow down e alla temperatura di circa 50 °C. Da tale accumulatore aspirano sia le pompe P-226 A/B che la pompa P-203. Le prime inviano il desorbente in alimentazione alla C-206 mentre l'ultima provvede a inviare il riflusso alle colonne C-202 e C-221.

La colonna C-206 (stripper idrogeno solforato) ha lo scopo di purificare il desorbente dall'inquinante H₂S al fine di riutilizzare la corrente per gli assorbitori in fase di rigenerazione. Lo strippaggio avviene con vapori di desorbente provenienti in parte dalla testa della colonna

C-221 e in parte dal ribollitore E-226 (posto sul fondo C-206) che riceve calore dalle n-paraffine grezze dal fondo di C-202.

Il desorbente senza H₂S viene aspirato dal fondo di C-206 tramite le pompe P-205 A/B e inviata a E-205 A/B in cui scambia calore con gli isomeri provenienti dal fondo della colonna C-221. Il desorbente esce da E-205 A/B alla temperatura di circa 80 °C e poi viene inviato a E-222 al fine di vaporizzarlo a spese del calore contenuto nella corrente "desorption effluent", proveniente dai reattori in fase di desorbimento. Il desorbente completamente vaporizzato uscente da E-222, alla temperatura di circa 175°C viene convogliato al forno F-222 per essere surriscaldato fino alla temperatura di 320÷330 °C.

Il desorbente in uscita dal forno viene diviso nelle seguenti correnti:

- Desorbente di lavaggio avente lo scopo di permettere sia le operazioni di lavaggio dei setacci prima della fase di rigenerazione che quelle di riempimento del letto. Tale corrente è la numero 28, che è la medesima utilizzata per la fase di co-purga;
- Desorbente principale che viene introdotto in parallelo nei reattori R-207÷201 posti in posizione di desorbimento attraverso la corrente 25. La miscela percorre il letto dall'alto verso il basso ed esce assieme alle n-paraffine desorbite.

Il collettore del desorbente e quello del "desorption effluent" sono collegati tramite un bypass provvisto di valvola automatica che permette di avere la continuità del circuito quando i reattori vengono intercettati per cause di blocco o per le fasi transitorie di avviamento o di fermo impianto.

Il flusso di desorbente e n-paraffine uscente dai reattori tramite la corrente 26 viene inviato a E-222 lato tubi per essere raffreddato e parzialmente condensato, scambiando calore con il desorbente di carica.

L'uscita dagli scambiatori E-222 lato tubi, alla temperatura di circa 130 °C, viene inviata a V-221 in cui avviene la separazione del liquido e del vapore. La parte liquida di tale serbatoio viene alimentata alla C-202 tramite la pompa P-221 A/B nel 27° piatto, mentre la fase vapore proveniente dal medesimo serbatoio è alimentata in colonna nel 31° piatto.

Dalla testa della colonna in questione si ottiene la separazione del desorbente contenuto nel "desorption effluent" mentre dal fondo vengono ricavate le n-paraffine grezze inviate a recuperi termici e quindi a stoccaggio. Le specifiche di processo della colonna devono essere tali da consentire desorbente esente da composti pesanti e n-paraffine esenti da desorbente. Tale risultato può essere ottenuto variando opportunamente il calore di fondo e il riflusso di testa colonna.

Il desorbente, uscente dalla testa colonna allo stato di vapore, viene condensato e sottoraffreddato fino a circa 35 °C in una serie di refrigeranti ad aria siglati E-223 A/E ed E-213 A/B. Il liquido viene raccolto nel ricevitore V-203 insieme a quello proveniente dagli scambiatori E-224 della colonna C-206.

Le n-paraffine di fondo della C-202 vengono aspirate dalle pompe P-209 e inviate prima al ribollitore E- 226 (fondo colonna C-206) e successivamente allo scambiatore E 216 B/C dove cedono calore al kerosene di carica. Il flusso in uscita dall'E-216 B/C è inviato a raffreddamento nello scambiatore ad acqua E-216 A per poi andare a stoccaggio ad un apposito serbatoio che invia la carica a successiva distillazione per il relativo frazionamento.

2.1.2 Rigenerazione dei setacci molecolari

I setacci molecolari, durante il normale funzionamento del processo di estrazione delle n-Paraffine da kerosene, sono soggetti a invecchiamento dovuto principalmente alla ostruzione della struttura cristallina per formazione di uno strato di deposito carbonioso denominato "coke". In particolare, la velocità di formazione del deposito di coke dipende dalla temperatura operativa, dal peso molecolare e dal contenuto di zolfo nella carica: tanto più alti sono questi parametri tanto più alta è la velocità d'invecchiamento.

Per tale motivo si rende necessario effettuare, periodicamente, una operazione di rigenerazione dei setacci molecolari che consiste in una combustione controllata del coke. Per effettuare la rigenerazione dei setacci molecolari si esclude dal circuito di assorbimento un reattore per volta mentre gli altri reattori rimangono nel ciclo di produzione; in tal modo, a rotazione, viene effettuata la rigenerazione di tutti i reattori.

L'unità kerosene-02 è provvista di un circuito che utilizza come gas di rigenerazione una miscela di azoto/aria con 1% in volume di ossigeno. La corrente, previa deidratazione, viene inviata nel reattore da rigenerare in cui si verifica la combustione dei depositi carboniosi

tramite innalzamento della temperatura fino a 510 °C. Il gas uscente dal reattore in rigenerazione viene inviato a recuperi termici ottenendo così una temperatura di 45°C.

La successiva fase consiste nel lavaggio dei reattori con desorbente. Si procede così alla fase di purga con azoto che, attraversando il letto dei setacci molecolari, rimuove tutto il desorbente.

In particolar modo, questo step prevede il riscaldamento del letto a 400 °C tramite:

I) Burn-off I fase: si addiziona aria alla portata di azoto in circolazione in quantità tale da avere nel letto una temperatura nel range tra 490 - 510 °C. In queste condizioni il contenuto di O₂ nel gas in circolazione deve mantenersi intorno a 1% in volume.

Al fine di garantire che la combustione del coke nella parte alta del letto avvenga in maniera completa, si fornisce la quantità di aria richiesta nel più breve tempo possibile. Si inizia con una portata di 400 Nm³/h e poi si aumenta con step di 200 Nm³/h ogni mezz'ora fino a 1000 Nm³/h. Si incrementa poi la portata di aria con piccoli gradini in funzione delle temperature del letto.

Quando tutte le termocoppie sono allineate ad una temperatura maggiore o uguale a 490°C si apre la linea di azoto e si verifica che l'apertura del controllore PIC-1226 sia minore del 50% in modo da inviare i gas di rigenerazione al forno e non all'atmosfera. L'apertura dell'azoto ha lo scopo di aumentare il venting e ridurre il quantitativo di CO, CO₂, SO₂ e H₂S nei gas di rigenerazione.

- Burn-off II FASE: Quando il fronte di combustione ha attraversato tutto il letto si mantiene ancora l'ossigeno nel gas in circolazione intorno a 1% in volume fino a quando le termocoppie si allineano alla temperatura del gas di rigenerazione. Questa fase deve comunque durare almeno due ore previa continua alimentazione di azoto.
- III) Clean-up burn-step: A questo punto si aumenta la temperatura di uscita dal forno per portare la corrente in ingresso dell'assorbitore da 400°C a 425°C e si mantengono queste condizioni per almeno un'ora. Si controlla sempre che l'ossigeno nel gas in circolazione sia intorno a 1% in volume e si continua ad immettere azoto.
- IV) Burn-off III FASE: a T = 425 °C costante, si aumenta la concentrazione di ossigeno nel gas di ricircolazione fino al 3% in volume per almeno due ore.

- V) Post-purga con azoto: completata la precedente fase, si continua a circolare con azoto per rimuovere l'ossigeno presente e si abbassano le temperature del letto fino al valore di esercizio.
- VI) Lavaggio con desorbente: diminuita la pressione del letto a blow-down, si rimuovel'azoto e si allineano tutte le temperature del letto per il successivo utilizzo.

2.2 Piping & Instrument Diagram – P&ID

2.2.1 Colonna di stripping C-206

Il prodotto di testa uscente dalla colonna C-221 contenente desorbente e H₂S viene inviato in parte alla colonna C-206 per rimuovere l'idrogeno solforato e in parte è unita al prodotto della sezione superiore. Tale miscela viene così raffreddata nello scambiatore ad aria E-224.

Attraverso il ricircolo di paraffine provenienti dalla colonna C-202 si procede a fornire calore al ribollitore di fondo E-226 che vaporizza una parte di desorbente uscente dal fondo della colonna C-206. La restante frazione viene invece inviata, attraverso le pompe P-205 A/B in parte allo scambiatore di calore E-205 A/B, che ha lo scopo di raffreddare gli isomeri provenienti dal fondo della colonna C-221, e il rimanente all'accumulatore di desorbente V-203.

L'alimentazione di tale accumulatore proviene sia dagli scambiatori E-223/224, i quali forniscono una miscela fredda di desorbente/H₂S, sia dall'impianto di carica di desorbente previa desolforazione. L'idrogeno solforato gassoso viene quindi inviato a blow-down, mentre le frazioni vapori costituite da desorbente e gas incondensabili vengono inviate alla colonna di abbattimento C-204 previo raffreddamento attraverso lo scambiatore E-204. Il separatore V-204 alimentato da tale scambiatore invia la frazione liquida di desorbente puro proveniente dal fondo all'accumulatore V-203.

La pompa P-203 preleva da V-203 la parte liquida e purificata di desorbente e invia la orrente in testa alla colonna C-206 e C-221 come riflusso. La portata è regolata attraverso un controllo in cascata di livello collegato al fondo della colonna che fornisce l'input al set point del controllore di portata della linea di riflusso.

Poiché la colonna di stripping è oggetto di studio nel caso della presente analisi, si fornisce di seguito la descrizione del sistema di controllo:

- LG-01: indicatore di livello a vetro;
- PI-01: indicatore di pressione;
- LT-01: trasmettitore di livello;
- LY-01-A: convertitore in corrente del segnale di pressione;

- LRC-01: controllore di livello che riceve il segnale da LY-01-A e invia il set-point al controllore di portata FRC-01;
- LAL-01: allarme di basso livello;
- LAH-01: allarme di alto livello;
- LI-01: indicatore di livello collegato a una logica di interblocco indefinita I.

Il segnale di livello viene quindi inviato al controllore di portata FRC-01 che misura la portata attraverso il relativo trasmettitore collegato alla flangia. Il segnale viene ricevuto dal convertitore di corrente/pressione FY-01 che comanda la valvola di controllo FCV-01. In ultimo, la colonna C-206 presenta un indicatore di temperatura TI 200-02 leggibile da sala controllo.

Tuttavia, poiché col tempo il desorbente si può arricchire di idrocarburi leggeri derivanti da reazioni secondarie di cracking, si può attivare un'operazione di separazione attraverso la colonna C-284 che riceve il desorbente inquinato dalla pompa P-226 A/B.

2.2.2 Colonna di abbattimento C-204

La miscela costituita da desorbente e incondensabili proveniente dall'accumulatore V-203 viene mandata al condensatore E-204 che invia le corrispettive fasi vapori e liquide al separatore V-204. Le pompe P-207 A/B prelevano la corrente liquida pura e la inviano nuovamente al V-203, mentre la fase gassosa di incondensabili è inviata sia a blow down che al compressore K-201/B.

La corrente entrante alla colonna C-206 è costituita sia dalla miscela desorbente/incondensabili che dalla frazione di gas compressi in uscita dal compressore. Una volta purificata tale corrente, dalla parte superiore della colonna escono gli incondensabili che sono inviati a blow-down, mentre dalla parte bassa la frazione liquida costituita da isomeri e desorbente è inviata attraverso le pompe P-208 A/B alla colonna C-221.

Il riflusso alla colona C-204 è fornito dagli isomeri provenienti dal fondo della colonna C-221.

2.3.2 Colonna di distillazione C-284

Quando la frazione di desorbente si arricchisce di prodotti leggeri, si preleva la miscela da V-203 e la si invia alla colonna C-284 che provvede ad alimentare il feed al piatto 21, 25, 30, 36 e 40. Dal fondo della colonna, le pompe P-1210A/B inviano una parte al fondo della colonna C-284, mentre la restante è inviata attraverso il contributo della pompa P-1288 allo scambiatore ad acqua E-266. Una volta raffreddata tale corrente, si reimmette il desorbente puro in V-203 o lo si invia alla sezione di stoccaggio di esano.

Dalla testa della colonna i vapori vengono fatti condensare nello scambiatore E-216 che invia la corrente al separatore V-284 e il rimanente è condensata attraverso lo scambiatore ad aria E-290. I gas incondensabili vengono inviati a blow-down, mentre la parte liquida è inviata attraverso le pompe P-284A/B a riflusso in testa della colonna C-284 e a stoccaggio di nafta isomerica.







CAPITOLO 3: DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI STRIPPING

3.1 Introduzione

L'operazione unitaria di stripping consiste nella separazione selettiva di uno (o più) componenti di interesse da una miscela in fase liquida utilizzando un componente terzo in fase gas. Nel nostro caso, la colonna C-206 ha lo scopo di rimuove H₂S dalla corrente di desorbente liquida utilizzando come fase gas lo stesso desorbente proveniente dalla colonna di separazione desorbente-isomeri C-221.



Figura 1: colonna C-206



Figura 2: colonna C-206



Figura 3: colonna C-206



Figura 4: colonna C-206



Figura 5: colonna C-206



Figura 6: colonna C-206



Figura 7: colonna C-206

3.2 Funzionamento della colonna di Stripping C-206

Lo scambio di materia tra la corrente liquida e quella gassosa è ottenuto mediante la creazione di un film di liquido sopra i corpi di riempimento di metallo che occupano un'apposita altezza di riempimento tale da garantire l'ottenimento delle specifiche di processo delle correnti in uscita.



Le principali caratteristiche di un corpo di riempimento sono:

- Superficie specifica S_B: e rappresenta quanti m² di superficie per unità di volume hanno esposta i corpi di riempimento sul quale si può formare il liquido;
- Grado di vuoto ε: frazione di spazio di vuoto per volume totale occupato dal riempimento;
- Materiale: può essere di tipo metallico, ceramico o polimerico;
- Peso: influisce soprattutto sul trascinamento del corpo di riempimento.

Le prime due proprietà sono relative alla geometria e si differenziano dai parametri operativi come visibile dalle seguenti correlazioni:

Proprietà geometriche:

-	Suparficia spacifica	S_{max} Superficie del riempimento (m ²)
	Superficie Specifica	$S_B = \frac{1}{Volume \ di \ colonna \ occupato \ del \ riempimento \ (m^3)}$
	Grada di vuoto	Volume disponbiile per la fase gas (m ³)
-		$\mathcal{E} = \frac{1}{Voluime di colonna occupato del riempimento (m^3)}$

Parametri operativi:

La superficie specifica e il grado di vuoto occupano un ruolo di primaria importanza per quanto concerne le caratteristiche geometriche. Dal punto di vista dei parametri operativi della colonna, invece, il dato più importante non è la superficie specifica, proprietà del solido, ma l'area interfacciale specifica. La prima è appunto la superficie del corpo di riempimento, mentre quella specifica viene a crearsi mediante il film di liquido.

La colonna deve inoltre operare in determinate condizioni di portata e velocità del liquido al fine di garantire un sufficiente scambio di materia tra le due fasi.

Lo spessore del film è definito in modo approssimativo mediante la seguente formula:

$$f_{t=} \left(\frac{3L_{v}\mu_{L}}{w\rho_{l}g}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Dove:

- L_v: portata volumetrica del liquido;
- μ_l : densità del liquido;
- w: lunghezza del condotto;
- ρ_{l} : densità del liquido.
Lo spessore di liquido del film aumenta in funzione della velocità della corrente gassosa, che deve essere determinata in modo tale da evitare una condizione di flooding e mantenendo invece la colonna idealmente al punto di loading che massimizza il coefficiente di scambio di materia. Infatti, in una colonna in controcorrente, fino a quando la velocità del gas è bassa, il liquido procede dall'alto verso il basso con un modo indisturbato e una propria velocità media. All'aumentare della velocità del gas, aumentano anche le forze tangenziali sul profilo del liquido. Il gas, proveniente dal basso, incontra il liquido che scende dall'alto lungo la superficie del corpo di riempimento alterandone la velocità e aumentando così il suo spessore. Questo perché la portata volumetrica può essere definita come:

$$L_{v} = (t \cdot p) \cdot u_{l}$$

Dove:

- t: spessore del film;
- p: lunghezza del condotto;
- ui: velocità media del film di liquido.

Quando la velocità del gas aumenta, diminuisce la velocità media del liquido, essendo questa determinata dall'integrale di un'area inferiore. Quindi, come visibile dalla formula soprastante, per mantenere costante lo stesso valore di L_v deve aumentare lo spessore t.

Se quindi la velocità del gas è sufficientemente elevata da abbassare notevolmente la velocità media del liquido che procede verso il basso, si arriva ad una condizione in cui questo valore è prossimo a zero e lo spessore aumenta a tal punto da determinare una condizione di allagamento, nonché una progressiva diminuzione di ϵ_{eff} .

Esiste inoltre una portata minima di liquido, chiamata "wetting rate" definita nel seguente modo:

$$L_{WR} = \frac{Lv}{p_b} = \frac{L_w}{\rho_L \cdot a \cdot A_c}$$

Dove:

- pb: perimetro bagnato del riempimento;
- a: area interfacciale specifica (approssimabile alla superficie specifica S_b);
- A_c: sezione della colonna.

Per avere uno scambio di materia efficace, questa portata deve essere superiore ad un determinato valore. Ad esempio, nel caso in cui si stia utilizzando un riempimento random, allora:

$$L_{WR} > 0,08 \ \frac{m^2}{h}$$

3.3. Tipologie dei corpi di riempimento

I corpi di riempimento più utilizzati per ottenere il trasferimento di materia variano a seconda della geometria e delle prestazioni che essi sono in grado di offrire. L'area interfacciale specifica, parametro di estrema importanza nella definizione della wetting rate, è funzione del tipo di elemento che è stato scelto in fase di progettazione.

3.3.1 Random

È la geometria più semplice. Si tratta di geometrie inizialmente semplici, come un cilindro vuoto, che con il tempo ha trovato la sua evoluzione in corpi più complessi capaci di offrire una maggior superficie di contatto riducendo lo spessore, e quindi il peso.



Figura 10: tipologie dei corpi di riempimenti

Durante le sue prime fasi di nascita, il metallo era solitamente modellato in modo tale da ottenere una geometria a forma di sella (berl saddle) o di cilindro (rashing rings).

Gli elementi ceramici, infatti, a causa della loro geometria, oltre a spessori elevati possedevano un'area superficiale estremamente bassa e, di conseguenza, gradi di vuoto geometrico relativamente bassi.



Figura 11: anelli di Pall Rings



Figura 12: anelli di Pall Rings

Modificando invece la geometria, e in particolar modo effettuando dei ripiegamenti dalla superficie esterna verso la parte centrale del materiale, si sono ottenute prestazioni nettamente superiori.

La ricerca in ambito industriale ha poi consentito di produrre corpi di riempimento di tipo polimerico che possiedono elevati gradi di vuoto e un peso nettamente inferiore rispetto alle precedenti tipologie. Per tale motivo si devono considerare opportune velocità del gas onde evitare il trascinamento fluidodinamico di tali corpi.

3.3.2 Riempimenti strutturati

Si tratta di una geometria più complessa che consente di controllare i percorsi preferenziali di direzione del flusso, nonché un'ottimizzazione della velocità che può essere controllata in un modo più efficace.



Figura 13: riempimento strutturato

Oltre ai metalli, in queste geometrie si possono utilizzare anche polimeri come nylon o eventualmente PVC consentendo così di formare dei veri e propri tessuti di supporto.

Tali strutture sono appositamente studiate per controllare la fluidodinamica delle correnti grazie a simulazioni CFD che consentono di dimensionare le giuste inclinazioni dei canali al fine di ridurre le perdite di carico.



Figura 14: riempimento strutturato

3.3.3. Griglie

Si tratta di corpi con elevatissimo grado di vuoto e superficie specifica relativamente bassa. Sono raramente utilizzati ad eccezione delle torri di raffreddamento evaporativo dove si hanno portate molto elevate di acqua rispetto alla corrente gassosa.



Figura 15: griglia

All'interno della colonna C-206 è stato adottato un riempimento di tipo random con Pall Rings metallici. Questi elementi presentano due file di fori perforati con curvature o alette rivolte verso il centro del cilindro, migliorando significativamente le prestazioni del riempimento.

I Pall Rings possono essere realizzati in diversi materiali metallici, tra cui acciaio inossidabile (gradi 304, 316, 430), acciaio al carbonio, rame e leghe speciali.

Per il processo in fase di progettazione, sono stati selezionati elementi con un diametro e un'altezza di 50 mm.

Di seguito sono riportate le proprietà.

Dati tecnici Pall Rings	D _i = 50 mm
Grado di vuoto (%)	96
Area sup. specifica (m²/m³)	100
N° per unità di volume (m³)	6000
Fattore di impaccamento (m ⁻¹)	107
Densità riempimento (kg/m³)	196 – 395
Dimensioni (mm)	50x50
Spessore (mm)	1



Tabella 2: proprietà corpo di riempimento

Figura 16: anelli di Pall Rings

3.4 Geometria dei supporti degli anelli di Pall Rings

I corpi di riempimento sono sostenuti da apposite griglie posizionate a specifiche altezze, le quali hanno subito un significativo sviluppo nel tempo.



Figura 17: griglia di supporto

Oggigiorno, vengono utilizzate griglie di sistemi a camino con una particolare geometria tridimensionale. Usare un profilo piatto, infatti, creerebbe una superficie di film liquido sulla griglia, ostruendo così il passaggio del gas proveniente dalla sezione inferiore.



Figura 18: griglia con sistema a camino

Figura 19: griglia con sistema a camino

Il sistema tridimensionale evita invece qualsiasi influenza della tensione superficiale del battente di liquido. Quindi, il gas proveniente dal basso viene fatto passare attraverso i fori più alti lasciando indisturbato il fluido che utilizza aperture geometriche dedicate. In questo modo si evitano interferenze tra gas e liquido consentendo così di avere drenaggi efficaci.

Altre tipologie di griglie sono invece utilizzate principalmente nella sommità delle sezioni al fine di evitare il trascinamento fluidodinamico dei corpi. Se infatti la velocità del gas è troppo elevata si ha la fluidizzazione del il solido, soprattutto se il suo peso è molto leggero come nel caso dei polimeri.



Figura 20: esempio 1

Figura 21: esempio 2

Figura 22: esempio 3

Un altro elemento di estrema importanza è il distributore del liquido inserito sopra i riempimenti nella parte più alta della colonna. Questi hanno lo scopo di introdurre la corrente di liquido sottoforma di gocce di piccole dimensioni richiedendo così spesso l'utilizzo di atomizzatori. Riducendo il diametro delle particelle del fluido si permette una distribuzione più efficace e omogenea lungo la superficie trasversale della colonna.



Figura 23: distributore del liquido



Figura 24: distributore del liquido





Figura 25: distributore del liquido

Figura 26: distributore del liquido

Vi è da specificare però che questo tipo di distributore può essere utilizzato soltanto sulla testa della colonna poiché richiede una perdita di carico piuttosto elevata e non ammessa in punti intermedi.

La soluzione alternativa è adoperare distributori di liquido che periodicamente permettono di irrorare il fluido ad altezze variabili con perdite di carico molto limiate. Le colonne, infatti, non possiedono un riempimento continuo lungo tutta la geometria, ma presentano interruzioni ad altezze ben determinate. Questo perché il liquido, nel progredire e nel distribuirsi dall'alto verso il basso, tende via via a percorrere le estremità del diametro interno della colonna, peggiorando naturalmente la fluidodinamica nelle zone centrali. Una colonna molto alta potrebbe, dunque, avere una zona centrale non bagnata dal liquido.

Per evitare questo fenomeno si cattura la corrente liquida attraverso un piatto che può avere diverse geometrie (e.g. a camino) e si effettuano delle ridistribuzioni ogni 3-4 metri circa.

Il liquido, una volta catturato viene alimentato attraverso la sezione trasversale di un redistributore visibile nella figura sottostante. Attraverso i fori presenti sul piatto inferiore, il liquido gocciola verso il basso, mentre la corrente gassosa passa attraverso canali dedicati.



Figura 27: redistributore del liquido



Figura 28: redistributore del liquido

Nella figura successiva è possibile osservare il funzionamento della colonna nella sua interezza. Nella parte superiore si trova l'ingresso del liquido che viene immesso attraverso un distributore in una zona che, in questo caso, presenta un riempimento impaccato.

Procedendo verso il basso, dopo la griglia di supporto, si trova il collettore del liquido che reimmette il fluido attraverso il redistributore in una zona che stavolta ha riempimenti random di Pall Rings. Si notano inoltre apposite griglie superiori per evitare la fluidizzazione del riempimento e inferiori per supportare il peso del materiale metallico.



Figura 29: esempio colonna di stripping

CAPITOLO 4: GEOMETRIA DELLA COLONNA C-206

La colonna di stripping C-206, operante dal 1974, ha un'altezza di 28720 mm (quota da fondo ellittico inferiore a superiore), un diametro pari a 3000 mm, uno spessore variabile tra 8 -10 mm e un sovraspessore di 3 mm. L'intero fasciame è poggiato su una colonna di altezza 6000 mm.

4.1 Specifiche di progetto

La pressione di progetto è di 3 ate (2,94 barg) mentre la temperatura di progetto è 130°C. Dalla tabella seguente è possibile evincere le principali proprietà geometriche.

Fluido:	Esano	Eff. Sald. Fondi	0,85	Altezza	28500 mm
Press. progetto	3 ate	Eff. Sald. Fasciame	0,85	Diametro	3000 mm
Press. Bolla	3 ate	Proc. Saltadure	Man+Aut.	Spessore	8/10 mm
Press. idrostatica	4,5 ate	Categ. Saldature	2°B	Capacità	198500 L
Temp. Progetto	130 °C			Peso vuoto	30000 kg
Categ. Appar.	2°			Materiale	Fe 42.1

Tabella 3: proprietà geometriche colonna C-206

4.2 Materiale

Il materiale utilizzato è, secondo norma UNI EN 5869:1965 l'acciaio Fe 42.1 che corrisponde a P235GH secondo norma 10028-2 o P885 grade C secondo norma ASTM. L'acciaio in questione presenta la seguente composizione chimica e proprietà meccaniche secondo UNI 5869:

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)
≤20	≥0,5	≤0,35	0,04	0,04	/	/

Tabella 4: composizione chimica acciaio Fe 42.1

Carico unitario di rottura R [kg/mm ²]	Spe mm di	ssori di lamier e carico di rot snervamento [kg/mm2]	a in tura Rs	Spe a	essori di lamie llungamento [kg/mm²]	ra e %	Carico u	rico unitario di snervamento a caldo Rs [kg/mm2]				
	≤16	16 ≤ s ≤ 40	≥40	≤16	16 ≤ s ≤ 40	≥40	T [°C]	150	200	250	300	350
42÷52	25	24	23	24	24	22		20,5	19,5	18	16	15

Tabella 5: proprietà meccaniche acciaio Fe 42.1

4.3 Disegno di assieme

La presente colonna possiede i seguenti bocchelli:

SIGLA	NUM.	DN	TIPO	SERIE E ACCOPPIAM.	SPESS. TUBO	SPORGENZA DALL'ASSE	DENOMINAZIONE
А	1	18''	W.N.	ANSI 150 RF	Da lam. s 10	Vedi dis.	Uscita vapori H₂S
В	1	10''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 40	1810	Ingesso rif. desor. liq.
С	1	1 1/2''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 50	1810	Sfiato
D	1	18''	W.N.	ANSI 150 RF	Da lam. s 10	1810	Ingresso vap. des+H ₂ S
E	1	14''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 30	1810	Ingresso vap. da rib.
F	1	10''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 40	1810	Uscita liq. a rib.
G	1	12''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 40	1810	Uscita liq. desorb.
$H_{1\div 2}$	2	2''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 80	1710	Indicatore di livello
L	1	2''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 80	1760	Drenaggio
M _{1÷3}	3	20''	W.N.	ANSI 150 RF	Da lam. s 10	1810	Passo d'uomo
$N_{1\div 6}$	6	8''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 40	1810	Scarico Pall Rings
0	1	2''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 80	1710	Riserva
Р	1	1 1/2''	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 80	1710	Indicatore di pres.
R	1	1 1/2"	W.N.	ANSI 150 RF	Sch. 80	1710	Indicatore di temper.
M ₄	1	24''	W.N.	ANSI 150 RF	Da lam. s 10	1810	Passo d'uomo

Tabella 6: elenco bocchelli colonna C-206

All'interno vi sono poi tre sezioni di riempimento supportate da 6 rispettivi piatti di spessore pari a 10 mm. La prima zona di riempimento, a partire dalla testa della colonna presenta un'estensione tra piatto e piatto di 4200 mm, mentre la seconda e la terza di 6200 mm. Attraverso il bocchello D, la corrente di vapore di desorbente e idrogeno solforato viene alimentata tra il primo e il secondo letto di riempimento ad un'altezza di 21350 mm, presa come riferimento la linea terra riportata nel disegno. L'ingresso del desorbente liquido proveniente dal riflusso è effettuato mediante il bocchello B che si trova nella vista perpendicolare alla rappresentazione del disegno ad un'altezza di 26600 mm. Il desorbente vapore proveniente dal ribollitore entra invece attraverso il bocchello E sotto il primo riempimento a partire dal basso, ad un'altezza di 6450 mm.

L'uscita del liquido desorbente purificato destinato a essere utilizzato nuovamente per rigenerare i setacci molecolari avviene invece attraverso il bocchello G ad una distanza di 2050 mm rispetto la base della gonna di supporto, mentre il liquido inviato al ribollitore esce dal fondo della colonna mediante il bocchello F posto a 2500 mm dalla base della gonna.

L'uscita della corrente gassosa di H₂S avviene nella sezione della testa attraverso il bocchello A situato ad una distanza di 25800 mm dalla linea terra.







CAPITOLO 5: PROCEDURE DI LAVAGGIO E BONIFICA DELLA COLONNA C-206

5.1 Lavaggio in fase gassosa

La colonna C-206, durante le fasi di fermo impianto, è soggetta a bonifica interna per rimuovere i depositi solforati che si formano nella produzione. Tuttavia, l'azienda in questione non possiede un report che descriva la procedura di lavaggio. A causa di ciò, è complicato essere a conoscenza delle possibili problematiche sorte durante la fase di lavaggio.

Dalle uniche informazioni reperite, la società ha comunicato di aver effettuato flussaggi con vapore acqueo a bassa pressione (3 bar) al fine di rimuovere l'inquinante H₂S e portare la sua concentrazione al minimo valore possibile.

Secondo quanto riferito da alcuni operatori, la bonifica della colonna C-206 veniva effettuata soltanto nel periodo di manutenzione, senza apparenti calendari che avrebbero dovuto definire gli intervalli di lavaggio. In più, non si conosce il bocchello di ingesso che è stato utilizzato per immettere il vapore.

In giugno 2022, rimosso il coibente per ispezione esterna della colonna, il personale si è accorto di un rigonfiamento nella zona della IV virola, motivo per il quale è stata coinvolta Saipex s.r.l. per lo studio dell'integrità strutturale della colonna e la valutazione della vita residua. Non si è a conoscenza di quando tale deformazione possa essersi verificata, poiché potenzialmente potrebbe esser presente da più tempo.

Per evitare dunque che si generino potenziali incendi causati dalla presenza di vapor d'acqua, ossigeno e idrogeno solforato, è stato scelto di procedere con una bonifica in fase liquida di seguito descritta.

5.2 Lavaggio in fase liquida

A seguito della deformazione della virola durante la fase di lavaggio con vapore a bassa pressione è stata scelta una procedura di bonifica che prevede l'immissione di 2400 kg di una miscela liquida che presenta i seguenti composti:

- Idrocarburo alifatico (composto prevalente);
- Alcoli C13-C15, ramificati, lineari ed etossilati;
- Alcoli C11-C15 secondari ed etossilati;
- Alcool isopropilico;
- Orange Oil;
- Acido dodecil-benzenzolfonico ramificato.

L'agente cleaner/degasser è stato utilizzato per:

- Contenere gli emulsionanti, solubilizzare composti organici e agenti bagnanti;
- Penetrare nelle superfici metalliche;
- Detergere mediante la creazione di emulsioni negli idrocarburi che si rompono in un intervallo di tempo di 3-6 ore in ambiente statico;
- Permette di bagnare tutte le superfici interne
- Rimane, in partizione di tensioattivi, dentro la fase idrocarburica;
- Fornisce condense di drenaggio con bassi valori di BOD, COD e TOC.

Nel nostro caso specifico, inoltre, il prodotto in questione rimuove dagli idrocarburi e dalle sostante organiche anche i film tenaci di solfuro di ferro piroforico e rimuove dall'interno delle attrezzature gli idrocarburi, gli ossidi metallici, i solfuri e il particolato solido lasciando così superfici pulite.

La particolarità del prodotto X, a differenza del vapore a bassa pressione precedentemente utilizzato, consiste soprattutto nel garantire che non si sviluppino reazioni esotermiche tra solfuro di Ferro FeS e ossigeno, dal momento che la sorgente di combustione, ossia gli idrocarburi, viene rimossa.

Inoltre, il cleaner non viene utilizzato nella sua forma concentrata ma diluita con opportune frazioni molari così da garantire un'efficace omogeneizzazione consentendo di raggiungere un'emulsione stabile.

5.2.1 Attività preliminari

Al fine di effettuare la procedura con le dovute precauzioni, l'area di installazione del cantiere viene delimitata con apposito nastro, mentre la stazione di dosaggio viene collocata su teli impermeabili con sacchi di materiale assorbente per prevenire eventuali versamenti accidentali.

Successivamente, nell'area di lavoro vengono installati cartelli di segnalazione del pericolo, in conformità alle normative vigenti sulla sicurezza sul lavoro.

In prossimità della zona operativa, come rilevato durante il sopralluogo della società incaricata, vengono predisposti serbatoi da 30 m³ ciascuno per lo stoccaggio temporaneo delle soluzioni reflue prodotte durante il trattamento. Il collegamento ai serbatoi sarà realizzato tramite manicotti flangiati di dimensioni adeguate.

5.2.2 Procedura e schema di ricircolo

Una volta isolata la struttura nella fase di fermo impianto, si provvede alla pulizia della colonna, compresa degli elementi strutturali interni come piatti, griglie, corpi di riempimento ecc., nonché delle tubazioni, fino a far riemergere la superficie metallica dei materiali.

Per separare l'attrezzatura dalle relative tubazioni viene effettuata la ciecatura delle seguenti flange a otto:

- 18": uscita nella parte superiore destinata agli scambiatori E-210 ed E-224;
- 18": ingresso al di sotto del primo letto di riempimento che immette liquido dalla colonna C-203 e C-221;
- 14": ingresso vapore dal reboiler E-226.



La tubazione che collega il fondo della colonna C-206 con il ribollitore E-226 viene smontata in campo e al suo posto vi si collega un tronchetto che riduce il diametro da 10" a 6". Lo stesso viene effettuato con la linea che avrebbe dovuto mandare il liquido di desorbente purificato nuovamente agli adsorbitori, con riduzione 12"x6" e si collegano entrambe al serbatoio di raccolta del fluido di ricircolo. Da questo tank, una pompa di estrazione provvede ad inviare la miscela nuovamente nella parte superiore della colonna.

Per evitare poi sovrapressioni, la colonna viene collegata all'atmosfera polmonando con azoto (salvo diverse indicazioni), mentre la vasca di miscelazione è collegata al sistema di abbattimento con appositi filtri a carboni attivi.

Per eliminare tutti gli inquinanti presenti nelle attrezzature in questione, si lavora ad una temperatura operativa di 80°C e pH pari a 7 (con riferimento acqua di processo) e un tempo complessivo compreso tra le 16 e le 24 ore massime.

Il volume dei reflui prodotti è quindi il risultato della quantità di soluzione utilizzata addizionata al volume di acqua circolante che è circa 50-60 m³. Dunque, è possibile supporre un volume minimo di reflui pari a 60 m³ e un massimo di 80 m³ prospettando una quantità minima di risciacquo finale.

La procedura di bonifica si ritiene soddisfatta quando il contenuto di H₂S e NH₃ non supera i 20 ppm.

CAPITOLO 6: CARATTERIZZAZIONE DEI DIFETTI

A seguito della scoperta della deformazione, sono state effettuate alcune ispezioni volte ad esaminare l'integrità strutturale della colonna in accordo agli standard API, i quali consentono di avere delle linee guida per le attività da svolgere.

6.1 Introduzione agli standard API

Gli standard API (American Petroleum Institute) costituiscono un primo e fondamentale passo per garantire i requisiti di durabilità, sicurezza e affidabilità delle attrezzature utilizzate nell'industria chimica e petrolifera. Queste norme sono sviluppate in collaborazione tra l'industria e le autorità regolamentari al fine di garantire il continuo aggiornamento per la sicurezza e la manutenzione in campo che solitamente avviene con una frequenza minima di cinque anni.

Dal momento in cui tale sistema è stato formato, ossia nel 1919, sono stati emanati più di 800 standards che contribuiscono all'accrescimento del know-how in merito alla sicurezza e alla protezione sostenibile all'interno delle industrie.

Nel nostro caso di studio approfondiremo, in particolare, le API 571, 579, 581 e 653.

6.2 API 653: Ispezioni visive

Lo standard API 653, che presenta il nome di "Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction", definisce le metodologie che devono essere seguite per poter effettuare ispezioni, riparazioni, alterazioni e ricostruzioni di serbatoi danneggiati. Quindi, al fine di valutare lo stato della colonna C-206 sono state effettuate ispezioni interne e esterne.

I fattori che influiscono sugli intervalli di ispezione che possono essere programmati sono la natura del prodotto stoccato, il risultato nella verifica di mantenimento visuale, la corrosione ammessa e il relativo rateo, il sistema di prevenzione della corrosione e così via.

Tali intervalli dovrebbero essere valutati sulla base della storia di utilizzo del vessel a meno che non vengano specificati motivi particolari che richiedono ispezioni più frequenti. Riuscire ad ottenere, ad esempio, l'andamento dell'estensione dello spessore nel tempo aiuta a fornire il rateo di corrosione e, di conseguenza, la vita utile residua dell'attrezzatura.

La società che gestisce l'impianto ISOVIL ha chiesto di effettuare, per conto terzi, analisi di tipo visivo, sia interne che esterne per valutare lo stato di funzionamento della colonna C-206, nonché le relative prove spessimetriche descritte nel paragrafo successivo.

6.2.1 Ispezioni esterne

Le condizioni esterne della colonna devono essere periodicamente analizzate con accurata ispezione visiva. Questa attività può essere effettuata sia dalla società che gestisce l'impianto che da ispettori qualificati esterni. Possibili risultati di perdite, distorsioni geometriche e corrosioni devono essere appositamente documentati.

Lo standard API 650 definisce un periodo minimo di ispezione generale effettuata dal suolo che non deve superare un mese, mentre per la valutazione specifica delle condizioni delle superfici di 5 anni o, eventualmente, considerando la seguente formula: Anni = RCA/4N, dove RCA indica la differenza dello spessore misurato e il minimo spessore resistente, mentre N il rateo di corrosione per millimetri annui. I vessel che presentano insulation, come nel caso attuale, devono essere analizzati senza coibentazione, non necessariamente nella loro interezza. In questo caso, è stato sufficiente rimuovere localmente il coibente, consentendo così di accedere allo shell tramite le scale e le passerelle di servizio.

Infine, in appendice C è inoltre presente una checklist delle parti da visionare che è stata rispettata nei suoi requisiti minimi.

6.2.1.1 Mantello e fondi ellittici

L'ispezione ha rilevato che la superficie delle virole si presenta in generale con primer protettivo in deterioramento, mentre localmente è possibile osservare la presenza di spesse scaglie di ossido. Tali incrostazioni sono dovute dal cosiddetto "CUI", ossia il meccanismo di corrosione da sottocoibente che ha prodotto profondità stimate di 0,5 – 2,0 mm.

Tale fenomeno, in particolare, interessa la virola n° 6 in corrispondenza del passo d'uomo M2 dove si rileva corrosione di profondità misurata fino a 5,0 mm a fronte di uno spessore nominale di 8,0mm e sovraspessore da corrosione di 3,0 mm.



Figura 30: scaglie provocate da corrosione sottocoibente



Figura 31: esempio della dimensione di una bugna



Figura 32: bugna superficie esterna



Figura 33: bugna superficie esterna

La zona che ha subito la deformazione si trova nella virola numero IV, all'altezza di circa 600 mm dal giunto circonferenziale con la III virola. In questa porzione è infatti possibile osservare una notevole deformazione come visibile nelle immagini sottostanti.



Figura 34: zona deformazione



Figura 35: zona deformazione

Questa deformazione, di dimensioni stimate L = 500 mm x H = 400 mm, ha una freccia di circa 20 mm verso interno colonna. Nelle due estremità est ed ovest si sono invece generate due bugne con freccia verso l'esterno colonna distanti circa 700 mm l'una dall'altra. Le bugne sono state indentificate con "A" lato nord e "B" lato nord-ovest.

In particolar modo, la bugna "A" posta a 620 mm dal giunto circolare tra la III e la IV virola ha un diametro di circa 400 mm e una freccia verso l'esterno di circa 25 mm.

Lato Ovest la bugna "B" posta a 690 mm dal giunto circolare tra la III e la IV virola ha un diametro di circa 400 mm e una freccia verso l'esterno di circa 30mm.



Figura 36: profilo longitudinale della deformazione



Figura 37: profilo longitudinale della deformazione

6.2.1.2 Connessioni

In generale, tutte le connessioni prive del coibente si presentano con primer protettivo deteriorato e localmente assente, con la presenza in alcune zone di scaglie di ossido dovute da corrosione sotto-coibente. Tali disuniformità hanno profondità stimata di 0,5 mm – 0,8 mm su una fascia di circa 60 mm di lunghezza/altezza.

Altre connessioni non scoibentate fanno intravedere la presenza di scaglie di ossido, mentre la coibentazione mostra invece un lamierino in discrete condizioni.



Figura 38: ispezione esterna del bocchello



Figura 40: ispezione esterna del passo d'uomo



Figura 42: ispezione esterna del jacket



Figura 39: ispezione esterna della giunzione del bocchello



Figura 41: ispezione esterna del bocchello



Figura 43: ispezione esterna del jacket

6.2.2 Ispezioni interne

Con gli stessi intervalli di ispezione definiti al punto 6.2.1. è stata effettuata l'ispezione interna del vessel.

6.2.2.1 Mantello e fondi ellittici

La verifica del fondo colonna è stata eseguita con l'ausilio del ponteggio fino a quota del primo piatto. Le porzioni di superficie non occupate dal riempimento con anelli in metallo tipo Pall Rings presentano purtroppo una patina di incrostazione che ostacola l'ispezione visiva.

Tuttavia, a seguito di raschiettatura localizzata, è stato possibile rilevare una corrosione di modesta entità ma senza riscontrare anomalie degne di nota.

Per quanto visibile, le aree ispezionabili si presentano in discrete condizioni.



Figura 44: ispezione interna dell'apertura



Figura 46: ispezione interna della superficie



Figura 45: ispezione interna della superficie



Figura 47: ispezione interna della superficie

6.2.2.2 Connessioni

La connessione L da 2" di fondo colonna, utilizzata come drenaggio, presenta corrosione generalizzata.



Figura 48: ispezione interna della connessione L



Figura 49: ispezione interna della connessione L

6.2.2.3 Distributore a canale

Il tratto di tubazione si presenta con una patina di incrostazione che ostacola la completa ispezione visiva del componente. A seguito di pulizia localizzata, si è rilevata una corrosione di modesta entità in discrete condizioni.



Figura 50: ispezione interna del distributore



Figura 51: ispezione interna del distributore

Il montaggio dei due "u-bolt", posti alle due estremità del distributore, non è in linea con il disegno costruttivo che prevede l'installazione con doppi dadi al fine di consentire il movimento di tale sezione a seguito della dilatazione termica.

All'interno delle canalette si rilevano spesse incrostazioni.



Figura 52: ispezione interna dei canali di distribuzione



Figura 53: ispezione interna dei canali di distribuzione

6.2.2.4 Griglia di supporto e trave

In generale si presentano in ordine e in discrete condizioni. All'esterno e all'interno, le griglie, presentano una patina di incrostazioni che ostacola l'ispezione complessiva. Per quanto visibile si presentano in condizioni accettabili.



Figura 54: ispezione interna della griglia di supporto



Figura 555: ispezione interna dei canali di distribuzione



Figura 56: ispezione interna dei canali



Figura 57: ispezione interna della griglia di supporto

6.3 Prove spessimetriche

Al fine di valutare l'assottigliamento dello spessore della zona di interesse, sono state effettuate delle rilevazioni con sonda ultrasuoni Olympus. A fronte di uno spessore nominale della IV virola di 10 mm e un sovraspessore di circa 3,0 mm si è scelto di suddividere in zone la bugna attraverso un reticolo:



Figura 58: reticolo per prova spessimetrica della zona deformata

La superficie analizzata che presenta la deformazione ha una larghezza di 1500 mm e un'altezza di 1200 mm. Sono state quindi effettuati 25 rilievi distanziati 250 mm.

Si riporta di seguito i risultati ottenuti.

						c	ARATTE	RISTICHE	STRUM	ENTAZION	IE AD ULTR	ASUONI	-		
								Ultrason	ic Equipi	nent Char	acteristics				_
APPARECCHIO AD ULTRASUONI						COSTRU	TTORE:	OLYMPI	JS				MODELLO: 45 MG		
Ultrasonic Instrument Manufa					Manufa	cturer						Model			
SONDA: OLYN	/IPUS		TIPO: D	790		FREQUE	NZA NO	MINALE:	5MHz				DIMENS	SIONE DEL	CRISTALLO: 10,0 mm
Sear	ch Unit		Туре			Nomina	l Freque	ncy					Crystal	Dimension	
BLOCCO TARA	TURA: A	GRADIN	NI .			TECNIC	A D'ESAN	1E:			CONTATTO): X			IMMERSIONE:
Calibration Blo	ock					Examina	ation Pre	paration			Contact				Immersion
MEZZO DI ACC	OPPIAM	ENTO: C	GRASSO			STATO S	UPERFIC	IE D'ESA	ME: LIN	1ITATO			TEMPER	RATURA SU	JPERFICIE: 25°
Couplant						Surface	Preparat	tion					Surface	Temperat	ure
PUNTI DI									MISU	JRE DI SPE	SSORE (mm	i)			
ISPEZIONE									Thickn	ess Measu	rements (m	ım)			
POS.	Α	В	C	D	Е	F	G	H		DN	Sp.Nom.	Toll.	C.A.	Sp.Min.	NOTE
1	10,4	10,5	10,8	10,3	9,8	9,9					10,0		3,0		VIROLA 4
2	10,2	10,0	9,9	9,5	9,1	10,4					"				"
3	10,8	10,5	9,4	9,2	10,0	9,7					"		"		"
4	10,4	10,5	10,2	9,8	9,9	10,2					"		"		"
5	10,0	10,2	10,2	7,3	10,5	10,4					"		"	["
													1		
					•••••••										
					İ										
					·										
					İ										
					·										
					•										
					·									h	
					İ										
					·										
					·										

Tabella 8:	risultato	delle	prove	spessimetriche	
iubciiu b.	insultato	uciic	prove	spessimethene	

Il punto D5 presenta un assottigliamento dello spessore pari a 7,3 mm, il quale risulta essere inferiore al valore nominale di 10 mm. Volendo essere conservativi e includendo questo dato nel calcolo dello spessore medio, si ottiene un valore pari a 9,7 mm. Dalle spessimetrie della restante parte del fasciame, si può assumere dunque 9,7 mm per tutto il fasciame, bugna compresa.

Il modello tridimensionale dell'analisi FEM sarà pertanto costruito con questo spessore.

6.4 API 571: Meccanismi di danneggiamento

Il primo passo per stimare la vita residua di un'attrezzatura, secondo la normativa API 579-1, è identificare la causa del difetto che nel tempo potrebbe provocare ulteriori danni. Questo aspetto è fondamentale non solo nell'analisi FFS, ma anche nelle valutazioni *Risk-Based Inspection* (RBI), dove è essenziale considerare sia le cause del danneggiamento sia i potenziali danni futuri.

L'insorgere di un difetto può derivare sia da un errore nella fase preliminare di progettazione, che porta alla messa in servizio di un'attrezzatura già non conforme, sia da fenomeni degradativi, come la corrosione, che si manifestano durante il normale funzionamento dell'impianto.

In generale, i tipici meccanismi di danneggiamento che si possono riscontrare nelle aziende petrolchimiche sono:

- Perdita locale e generale di metallo dovuto a corrosione/erosione;
- Rottura di superfici;
- Rottura di sottosuperfici;
- Microfessurazioni o formazione di microvuoti;
- Cambiamenti metallurgici.

Lo standard API 571 fornisce linee guida dettagliate sui meccanismi di danneggiamento che possono verificarsi negli impianti dell'industria chimica in generale. Questo documento è quindi essenziale per identificare e comprendere le varie tipologie di fenomeni che possono influenzare i materiali e le attrezzature, come la corrosione, l'erosione, la fatica, il creep e così via.

Si tratta quindi di uno strumento di primaria importanza per il personale addetto alle ispezioni e alla manutenzione. Infatti, aiuta a identificare le aree critiche degli impianti che potrebbero essere soggette a deterioramento e spinge le aziende a conformarsi agli standard di sicurezza e integrità.

La sezione 4 del suddetto standard tratta la parte metallurgica e meccanica relativa al danneggiamento come la perdita uniforme o localizzata di spessore, la corrosione da alta

temperatura ecc., mentre la sezione 5 approfondisce i meccanismi di danno concernenti l'industria di refining come quello della corrosione da ammina, da H_2S , da H_3PO_4 e molti altri.

Si mostra quindi una tabella riassuntiva dei danni che sono stati analizzati in questo standard.

DM#	Damage Mechanism	DM#	Damage Mechanism
1	Sulfidation	34	Softening (Spheroidization)
2	Wet H ₂ S Damage (Blistering/HIC/SOHIC/SSC)		Reheat Cracking
3	Creep / Stress Rupture	36	Sulfuric Acid Corrosion
4	High temp H ₂ /H ₂ S Corrosion	37	Hydrofluoric Acid Corrosion
5	Polythionic Acid Cracking	38	Flue Gas Dew Point Corrosion
6	Naphthenic Acid Corrosion	39	Dissimilar Metal Weld (DMW) Cracking
7	Ammonium Bisulfide Corrosion	40	Hydrogen Stress Cracking in HF
8	Ammonium Chloride Corrosion	41	Dealloying (Dezincification/ Denickelification)
9	HCI Corrosion	42	CO ₂ Corrosion
10	High Temperature Hydrogen Attack	43	Corrosion Fatigue
11	Oxidation	44	Fuel Ash Corrosion
12	Thermal Fatigue	45	Amine Corrosion
13	Sour Water Corrosion (acidic)	46	Corrosion Under Insulation (CUI)
14	Refractory Degradation	47	Atmospheric Corrosion
15	Graphitization	48	Ammonia Stress Corrosion Cracking
16	Temper Embrittlement	49	Cooling Water Corrosion
17	Decarburization	50	Boiler Water / Condensate Corrosion
18	Caustic Cracking	51	Microbiologically Induced Corrosion (MIC)
19	Caustic Corrosion	52	Liquid Metal Embrittlement
20	Erosion / Erosion-Corrosion	53	Galvanic Corrosion
21	Carbonate SCC	54	Mechanical Fatigue
22	Amine Cracking	55	Nitriding
23	Chloride Stress Corrosion Cracking	56	Vibration-Induced Fatigue
24	Carburization	57	Titanium Hydriding
25	Hydrogen Embrittlement	58	Soil Corrosion
26	Steam Blanketing	59	Metal Dusting
27	Thermal Shock	60	Strain Aging
28	Cavitation	61	Sulfate Stress Corrosion Cracking
29	Graphitic Corrosion (see Dealloying)	62	Phosphoric Acid Corrosion
30	Short term Overheating – Stress Rupture	63	Phenol (carbolic acid) Corrosion
31	Brittle Fracture	64	Ethanol Stress Corrosion Cracking
32	Sigma Phase/ Chi Embrittlement	65	Oxygen-Enhanced Ignition and Combustion
33	885°F (475°C) Embrittlement	66	Organic Acid Corrosion Of Distillation Tower Overhead Systems

Tabella 8: elenco d	delle tipologie	principali di	danneggiamento
---------------------	-----------------	---------------	----------------

Si sono dunque presi in esame i seguenti meccanismi di azione:

- Sulfidation (DM1);
- Wet H₂S (DM2 HIC & SSC);
- Corrosion Under Insulation (DM46);
- Atmospheric Corrosion (DM47);
- Cooling Water Corrosion (DM49);

6.4.1 Corrosione da alta temperatura da Zolfo (DM1)

L'acciaio al carbonio, gli acciai basso legato al cromo, gli acciai inossidabili serie 300 e 400 possono essere soggetti a corrosione per reazione con zolfo e suoi composti a temperature superiori ai 200°C. Vi è da specificare, inoltre, che la presenza di idrogeno accelera la velocità di corrosione.

I fattori di maggiore rilievo per l'attacco da zolfo ad alta temperatura sono la composizione della lega, la temperatura, la concentrazione dello zolfo e dei suoi composti. Ad alta temperatura, queste sostanze si decompongono termicamente e producono H₂S e mercaptani, ossia composti organici paragonabili ad alcoli dove l'atomo di ossigeno è sostituito con quello di zolfo.

Se la temperatura è maggiore di 200°C, per contenuti di zolfo superiori a 0.2 ÷ 0.3 % in peso, il greggio è corrosivo nei confronti degli acciai al carbonio e basso legati. Invece, al di sopra di 450°C la velocità di corrosione diminuisce drasticamente nel caso in cui si abbia formazione di coke sulle superfici metalliche.

Tuttavia, se l'acciaio è in grado di generare film protettivi sulla sua superficie, come accade ad esempio nel caso di acciai inossidabili grazie alla presenza di cromo, si ha una buona resistenza all'attacco di zolfo.

I parametri che influenzano tale fenomeno sono riassunti nel seguente diagramma di McConomy che riporta curve di acciaio in funzione del rateo di corrosione e della temperatura.



Grafico 1: diagramma di McConomy

In genere la resistenza delle leghe a base di ferro e nickel è determinata dal loro contenuto in cromo. Un buon materiale resistente da utilizzare in raffineria potrebbe essere un acciaio inossidabile appartenente alla serie 300.

La morfologia di attacco da zolfo ad elevata temperatura è in genere di tipo uniforme, e può essere rilevata con le usuali misure di spessimetria ad ultrasuoni.

Tuttavia, tale meccanismo è potenzialmente attivo nel circuito oggetto di analisi sui forni F-2014, F222 e F-223, ma non sulla colonna C-206, dal momento che essa non lavora a temperature elevate, e pertanto è stato escluso come causa dell'incidente.

6.4.2 Wet H₂S (DM2)

I fenomeni di danneggiamento in presenza di H₂S umido possono aver luogo in ambienti estremamente differenti e interessano sostanzialmente tutti gli acciai al carbonio o basso legati. Si elencano, di seguito, quattro possibili tipologie di danneggiamento che danno luogo al blistering o al cracking dei materiali precedentemente citati.

- a) Tensocorrosione da solfuri (Sulfide Stress Cracking SSC): rottura per azione combinata di una sollecitazione a trazione in presenza di acqua e H₂S. Si verifica solitamente sulla superficie del metallo e interessa, in modo particolare, la zona termicamente alterata delle saldature (durezza < 200 HB consigliata). Il trattamento termico di distensione ha effetto benefico in quanto diminuisce la durezza e le tensioni residue che rendono il materiale suscettibile a SSC;
- b) Hydrogen Induced Cracking (HIC): blister di idrogeno possono formarsi a differenze profondità dalla superficie del metallo, nel centro della lamiera o in prossimità delle saldature. Vi è da precisare, ad ogni modo, che tale danneggiamento interessa anche i metalli a bassa durezza. La pericolosità di tale fenomeno consiste che alcuni casi blister adiacenti o situati su piani vicini possono sviluppare cricche che si uniscono tra di loro così da formare un cracking a gradini (stepwise cracking);
- c) Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking (SOHIC): danneggiamento simile a quello precedente, ma potenzialmente più pericoloso in quanto assume l'aspetto di microcricche allineate una sopra l'altra che possono interessare l'intero spessore del

metallo. Il cracking risultante è perpendicolare alla superficie ed è causato da elevati livelli di sollecitazione (residua o applicata). Si manifesta di solito nel metallo base in prossimità della zona termicamente alterata della saldatura, dove si origina da un danneggiamento da HIC o altri difetti, incluse le cricche da SSC.

d) Blistering da idrogeno: può assumere la forma di rigonfiamenti in corrispondenza della superficie interna, della superficie esterna o nel mezzo di una tubazione o di una lamiera. L'idrogeno atomico formato dalla corrosione sulla superficie del metallo diffonde nell'acciaio e si ricombina a idrogeno molecolare in corrispondenza di discontinuità del metallo quali inclusioni o laminazioni. Le molecole di idrogeno sono troppo grandi per diffondere all'esterno e la pressione sale fino a provocare la deformazione del materiale e la formazione del blister. Per quanto riguarda le apparecchiature in servizio di wet H₂S, perché si abbia il danneggiamento sono necessari la presenza di acqua come fase separata e la presenza di H₂S (cracking con 50 ppm da esperienza pratica).

La colonna C-206 non lavora, tuttavia, in condizioni umide, salvo la fase di lavaggio. Come vedremo, anche nel caso in cui la sua bonifica sia stata effettuata con vapor d'acqua saturo a 3 bar, la durata di tale lavaggio non può indurre a supporre un meccanismo di danneggiamento di tipo "Wet H₂S", dal momento che il flusso in questione è utilizzato, tra l'altro, proprio per rimuovere il composto inquinante. Per questo motivo è stato escluso come possibile causa.

6.4.3 Corrosione sottocoibente (DM46)

La corrosione esterna sotto coibente colpisce le linee e le apparecchiature quando si verifica l'ingresso di acqua nella coibentazione. Se il lamierino di protezione del coibente non è applicato correttamente, se presenta dei danneggiamenti o se ha un design inadeguato, in caso di contatto con acqua, proveniente ad esempio da perdite di sistemi adiacenti (circuiti di raffreddamento, circuiti antincendio, condensazione di vapore derivante da perdite nel sistema di tracciatura ecc.) o da precipitazioni naturali, questa penetra nel coibente impregnandolo e causando la corrosione della superficie metallica su cui è applicata.

La corrosione sotto coibente si manifesta come un attacco localizzato e si verifica nell'intervallo di temperatura compreso tra -5° C e + 150°C assumendo massima intensità tra i 60°C e 120°C.

Tuttavia, recenti studi (soprattutto NACE) hanno innalzato la temperatura di suscettibilità alla CUI fino a 175°C. Nello studio è stato preso tale valore come limite oltre il quale non vi è più rischio di CUI.

Come abbiamo visto nelle ispezioni esterne, le superfici sottocoibente sono state soggette a corrosione a causa del meccanismo in questione. Tuttavia, la corrosione non può aver portato a una deformazione così importante della virola. Dunque, anche questo meccanismo di azione non è stato considerato.

6.4.4 Corrosione atmosferica (DM7)

La corrosione atmosferica è una forma di corrosione causata dall'umidità in particolari condizioni atmosferiche. Gli ambienti marini e gli ambienti industriali inquinati da contaminanti atmosferici sono quelli maggiormente aggressivi.

I fattori critici, che includono la localizzazione dell'ambiente (industriale, marino, rurale), concernono l'umidità, particolari configurazioni che trattengono la pioggia, la corrente evaporata dalle torri di raffreddamento, le condense di vapore, la presenza di sali e di composti di zolfo. Naturalmente, le configurazioni che trattengono l'acqua o l'umidità sono maggiormente suscettibili all'attacco.

La velocità di corrosione aumenta con la temperatura fino a circa 120 °C. Sopra tale valore le superfici sono in genere troppo asciutte affinché si possa instaurare corrosione, con l'eccezione di quella che si verifica anche a temperature sopra i 120°C per il caso di sotto coibente (CUI).

In generale sono coinvolte le attrezzature e le tubazioni che lavorano a temperature sufficientemente basse da consentire la presenza di umidità sulle superfici. L'attacco può essere generalizzato o localizzato a seconda che l'umidità sia intrappolata o meno. La preparazione superficiale e un appropriato rivestimento protettivo sono fattori fondamentali per un'azione di protezione a lungo temine. Come è stato possibile analizzare nel paragrafo 6.2.1 dedicato alle ispezioni esterne, la colonna C-206 presenta, di fatto, notevole corrosione sulla superficie esterna ma che non può essere stata la causa determinante della deformazione.

6.4.5 Incendio interno

I meccanismi di danneggiamento precedentemente analizzati non possono essere considerati come cause primarie dell'alterazione geometrica in questione. Eventualmente, ciò che può esser detto è che un assottigliamento dello spessore in una specifica area riduce la resistenza alla pressione, rendendo la zona più vulnerabile alla deformazione in caso di sovrapressione. I risultati spessimetrici ottenuti al paragrafo 6.3 forniscono uno spessore medio pari a 9,7 mm a fronte di 10,0 mm nominale. Una perdita di 0,3 mm rientra nel rateo anno di corrosione della colonna di esercizio e un valore così basso non può essere considerato causa di deformazione.

Si ritiene più probabile, invece, che durante le condizioni di esercizio si siano formati dei depositi di FeS e altre tipologie di solfuri sulla superficie dei corpi di riempimento. Quindi, si ipotizza che durante la fase di lavaggio con vapor d'acqua a 3 bar si sia verificata una reazione esotermica tra l'ossigeno e il solfuro di ferro:

$$2FeS + \frac{7}{2}O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 2SO_2$$

Questa reazione è fortemente esotermica e può portare localmente il metallo a temperature superiori a 600-700°C capaci di danneggiare strutturalmente l'integrità dell'acciaio.

In alcuni casi, temperature superiori a 1000°C sono state osservate in depositi di solfuro di ferro esposti all'aria atmosferica, provocando così incendi o fessurazioni nei materiali circostanti.

Tuttavia, è estremamente difficile stimare una temperatura poiché questa dipende da numerosi fattori, come le quantità di solfuri e la temperatura del sistema. Non avendo a disposizione la procedura di lavaggio della colonna in fase vapore, non è stato possibile arrivare a conclusioni quantitative.
Conoscendo però la pressione del vapor d'acqua, è stata ricavata almeno la temperatura di esercizio, pari a quella di saturazione, che risulta essere: T*(P = 3 bar) = 133,5 °C.

Si tratta comunque di un valore utilizzato in fase di lavaggio piuttosto basso e che, da solo, non è capace di provocare la reazione di combustione, dal momento che servirebbero almeno 300°C. Se ci sono però degli accumuli di solfuri in una zona che non è soggetta a raffreddamento adeguato, si può ipotizzare che si siano verificati hot-spot localizzati e che abbiano generato la deformazione.

Questa conclusione può essere considerata la più probabile, dal momento che gli stessi operatori hanno verbalmente riferito di aver osservato, in passato, la formazione di piccole fiamme per breve tempo senza conseguenze. Potrebbe essere che una di queste reazioni si sia propagata più del solito e che abbia prodotto la bugna.

L'innalzamento di temperatura può essere giustificato anche dai rilievi metallografici al paragrafo 6.5.2.1, i cui risultati mostrano un ingrossamento dei grani nella zona di possibile alterazione termica.

L'analisi agli elementi finiti verrà quindi condotta utilizzando come causa dell'incidente una combustione interna.

6.5 API 579: Fitness for Service

Il presente standard serve a stimare la vita utile residua per garantire il normale continuamento dell'operabilità dell'impianto soggetto a danno. Il documento è suddiviso per tipologie di danneggiamento, e ogni categoria presenta pressoché la stessa struttura di passaggi da effettuare.

In particolar modo:

- Identificazione del danno e possibile causa: le condizioni di progetto, di fabbricazione, i materiali e la storia dell'attrezzatura consentono di stabilire con maggior certezza il meccanismo di danno;
- Determinazione del campo di applicazione e limiti di utilizzo: ad esempio, una determinata FFS potrebbe essere sufficiente per opportune tipologie di attrezzature e materiali ben precisi;
- 3. Recepimento informazioni: necessarie per stabilire l'output dell'analisi;
- 4. Accettabilità: consiste nel valutare il criterio di convergenza di ogni FFS;
- 5. Vita residua dell'attrezzatura: si calcola una stima del futuro danno;
- 6. Azioni correttive: valutazione dei possibili rimedi da applicare al fine di garantire il corretto funzionamento in sicurezza dell'attrezzatura o dell'impianto;
- Calendario di ispezione: si stabiliscono determinati periodi di ispezione in modo tale da poter studiare l'andamento del difetto verificatosi;
- 8. Output: analisi dei dati e della causa dell'avvenimento accidentale.

L'analisi FFS, come vedremo nel paragrafo successivo, ha tre livelli di approfondimento che possono essere eseguiti nel caso in cui si necessiti di risultati più accurati.

Tra tutti i possibili meccanismi di danno elencati nello standard, quali local metal loss, pitting corrosion, hydrogen blisters e via dicendo, una specifica parte copre il danneggiamento delle attrezzature soggette a incendio. Avendo ritenuto quest'ultimo il più probabile, si riporta l'approfondimento di tale sezione.

6.5.1 API 579 – 11: Valutazione del danneggiamento da incendio

L'analisi fitness for service che studia le attrezzature soggette a incendio è descritta nella parte 11 dello standard.

In generale, tali danneggiamenti producono le seguenti problematiche:

- a. Distorsione meccanica e danneggiamento strutturale;
- b. Degradazione delle proprietà meccaniche;
- c. Degradazione della microstruttura metallurgica;
- d. Degradazione della resistenza a corrosione, suscettibilità al cracking e al creep;
- e. Presenza di micro-cricche nei "pressure boundary";
- f. Stress residui.

Al fine di produrre un report completo e dettagliato, i danni prodotti da incendio dovrebbero essere accompagnati da dati sia durante l'evento accidentale che dopo.

Tuttavia, dal momento che gli incendi avvengono solitamente in momenti casuali di funzionamento e/o di fermo impianto, tale visione è utopica e difficilmente si possono ottenere informazioni dell'ipotetico incendio durante il suo sviluppo, come la durata, la massima temperatura e così via.

Per poter stimare la temperatura massima, o il range di temperatura nel quale si è verificato l'evento, si ricorre ai risultati dell'incendio e al suo danneggiamento analizzando, ad esempio, la struttura metallografica con il contributo di apposite tabelle ottenute dall'esperienza.

In generale, possiamo affermare che qualsiasi dato possibilmente reperibile dall'incendio contribuisce all'acquisizione di importanti informazioni. Ad esempio, da un semplice video che potrebbe esser stato registrato da un proprio dispositivo personale o dalle videocamere di sorveglianza, si può ottenere una temperatura indicativa in base al colore della radiazione termica confrontata con la tabella sottostante inserita in questa sezione come esempio.

Dediction Color During a Fire	Approximate Temperature		
Radiation Color During a Fire	(°C)	(°F)	
Black	540	1000	
Faint Dark Red	590	1100	
Cherry Red (Dark)	650	1200	
Cherry Red (Medium)	700	1300	
Red	760	1400	
Light Red	815	1500	
Reddish-Orange	870	1600	
Orange	930	1700	
Orange To Pale Orange-Lemon	980	1800	
Orange To Pale Orange-Lemon	1040	1900	
Orange To Pale Orange-Lemon	1090	2000	
Lemon	1150	2100	
Light Lemon	1205	2200	
Yellow	1260	2300	
Light Yellow	1315	2400	
Yellowish-Grey: "White"	1370	2500	

Tabella 9: temperature dell'acciaio ricavabili dal colore della radiazione elettromagnetica

Nel nostro caso non abbiamo però nessun dato inerente all'incendio, ed è per questo che non può esser stimata la temperatura tramite questo tipo di analisi, se non da un calcolo puramente entalpico.

Ad ogni modo, una volta stabilita la possibile zona del metallo esposta al calore, la tabella 11.6 dello standard enuclea i corrispettivi meccanismi di degradazione che potrebbero essersi verificati. Si riporta di seguito il suo riassunto:

- a. Riduzione della durezza, deformazione plastica e invecchiamento di leghe di alluminio;
- b. Riduzione della durezza e deformazione plastica di leghe di rame;
- c. Indurimento e/o tempra di acciai trattabili termicamente (e.g. AST A193 B7);
- Accrescimento dei grani, degradazione della resistenza a corrosione e suscettibilità al cracking, alla riduzione di durezza, alla deformazione plastica, all'indurimento e alla resistenza di tenacità di acciai al carbonio e bassolegati;
- e. Creep di breve durata e rottura a creep;
- f. Sferoidizzazione di acciai al carbonio dopo lunghi tempi di esposizione;
- g. Rilascio di stress residui di leghe di Nichel;

- h. Sensibilizzazione di acciai inossidabili;
- Contaminazione di alogeni di acciai austenitici o superfici in leghe austenitiche, specialmente sotto isolamenti umidi o se acqua salata è utilizzata come fonte di spegnimento del fuoco;
- j. Corrosione da liquido metallico come la caduta di gocce di zinco fuso in acciai austenitici inossidabili;
- k. Fusione di leghe;
- I. Eccessiva ossidazione di metalli per perdita di spessore;
- m. Deterioramento delle guarnizioni e della tenuta delle valvole;
- n. Danneggiamento al rivestimento;
- o. Alti stress residui causati da distorsioni e perdita di supporti;
- p. Cracking di metalli a ausa di distorsioni;
- q. Infragilimento di alcuni gradi di acciai quando raffreddati nel range di temperature critiche;
- r. Formazione di strutture in ghise dovute alla carburazione localizzata e fusione di leghe ricche di carbonio.

Tali meccanismi di danno devono essere analizzati e presi in considerazione per poter procedere all'analisi Fitness for Service che si serve, inoltre, dei seguenti dati:

- a. Variazioni della circonferenza e del diametro del vessel cilindrico;
- b. Dimensioni dei profili di vessel verticali e orizzontali;
- c. Rettilineità di shell e tubazioni;
- d. Orientamento dei bocchelli;
- e. Misure di verticalità;
- f. Prove di durezza sul metallo di base e sulle saldature;
- g. Rimozione di campioni di prova per test meccanici;
- h. Prove spessimetriche delle attrezzature soggette a pressione;
- i. Metallografie in situ e sue repliche;
- j. Test di penetrazioni liquide per la rilevazione di cricche;
- k. Valutazione delle condizioni dell'attrezzatura concernenti la scala, la fusione, il danneggiamento del rivestimento, dell'isolamento e delle relative barriere.

La colonna C-206 possiede pressoché tutti i punti analizzati in precedenza, ad eccezione del punto j.

Una volta stabilite le informazioni necessarie, deve essere valutata la variazione delle proprietà meccaniche dell'acciaio soggetto a incendio. Studi metallografici e test di prove meccaniche possono aiutare all'ottenimento della variazione di tali proprietà con apposite correlazioni di misure di durezza e resistenza ultima a rottura. È possibile reperire un approfondimento sull'analisi metallurgica nel paragrafo successivo.

Inoltre, si consiglia, se possibile, di effettuare scan tridimensionali e mappature laser che consentono di ottenere, insieme agli altri dati, le dimensioni, la verticalità e altri importanti dati sulla colonna in esame.

Ottenute dunque le relative informazioni, si procede all'analisi fitness for service che prevede tre livelli di analisi:

- a. Livello 1: è il più semplice e prevede la valutazione delle zone di danno soggette ad aumento di temperatura, senza la necessità di valutare la variazione di proprietà meccaniche. Se i risultati prodotti non sono soddisfacenti, si procede all'analisi di tipo 2;
- b. Livello 2: consente di determinare l'integrità strutturale del componente e le proprietà alterate dell'acciaio. Nel caso in cui sia possibile osservare visivamente le deformazioni dell'attrezzatura, si ricorre quindi a questo tipo di approfondimento che prevede il calcolo delle tensioni ammissibili deturpate di una percentuale a causa del danneggiamento del materiale. Se i dati ottenuti dalla fitness for service non sono soddisfacenti, si procede al terzo livello;
- c. Livello 3: nel caso in cui la tensione ammissibile sia stata ridotta al limite di una tolleranza ammessa, si ricorre all'analisi completa mediante stress analysis, ossia il calcolo agli elementi finiti (FEM). In questa fase, repliche metallografiche, prove di durezza ed eventualmente test meccanici del materiale alterato contribuiscono all'ottenimento di informazioni importanti per la modellazione dell'analisi FEM.

Tuttavia, nel caso in cui il risultato dell'evento abbia prodotto notevoli deformazioni osservate a seguito di ispezioni interne, l'esperienza dell'ingegnere progettista può consentire

di proporre direttamente una fitness for service di terzo livello, senza passare necessariamente dalle due precedenti.

In linea generale, si riporta comunque il diagramma di flusso che propone lo standard API 579 per la scelta del livello necessario:



6.5.2 API 591 - Annex 11.1B: Analisi metallurgica e valutazione dell'alterazione delle proprietà meccaniche

L'appendice 11.1B dello standard API 579 consente di investigare l'alterazione della struttura metallografica dell'acciaio e delle sue proprietà meccaniche a seguito di incendio.

In particolar modo, al fine di determinare cambiamenti della resistenza ultima a rottura di acciai al carbonio e basso legati, l'appendice in questione propone l'esecuzione di prove di durezza effettuate sulla superficie del materiale secondo una grigliatura al fine di ottenere un campionamento più ampio. Infatti, poiché l'aumento di temperatura prodotto da un ipotetico incendio ha comportato l'alterazione sostanziale di R_m, è buona norma quantificare la sua riduzione. Queste prove di durezza consentono infatti di ottenere buoni risultati sulla resistenza ultima a rottura ma non su quella a snervamento che, se stimata con i risultati ottenuti da tale analisi, può produrre errori significativi del valore.

Acciai che sono stati esposti a temperature inferiori a un valore critico, che per quelli al carbonio è solitamente 720°C potrebbero presentare una riduzione della resistenza ultima a rottura sotto i loro limiti, e ciò richiede dunque o un nuovo calcolo o una sostituzione del materiale. L'acciaio che è stato sottoposto a temperature inferiori a questo valore presenta tipicamente differenti microstrutture in funzione del tempo di esposizione e della velocità di raffreddamento che possono produrre trasformazioni di fase con conseguente aumento di R_m e riduzione della tenacità. Vi è da specificare tuttavia che tali trasformazioni di fase, che produrrebbero una microstruttura mista, potrebbero tuttavia riportare basse alterazioni del valore di durezza o, addirittura, lasciare inalterata tale proprietà, mentre per quanto concerne la tenacità si sottolinea comunque il fatto che essa non è direttamente correlabile alla durezza. Ciò che possiamo affermare è invece che aumenti significativi di durezza corrispondono solitamente a diminuzioni significative di tenacità.

Inoltre, se l'acciaio è stato esposto a lungo tempo a temperature superiori a quella di accrescimento dei grani, e se anche la fase di raffreddamento è avvenuta in tempi brevi, si possono ottenere strutture con durezza relativamente bassa e un aumento della transizione duttile-fragile grazie all'ingrossamento della dimensione dei grani.

Selezionata la zona di analisi, la preparazione metallografica delle sue superfici prevede la rimozione di almeno 0,5 mm di materiale al fine di rimuovere gli ossidi, le carburazioni o le

decarburazioni avvenute nello strato esterno dell'acciaio. Si riporta nell'appendice X (da scrivere) l'approfondimento di questa preparazione.

Per confrontare l'alterazione della struttura microcristallina da quella originale, i campioni sono prelevati nella zona termicamente inalterata, in quella di transizione e lì dove l'aumento di temperatura ha provocato la maggior modifica. Infatti, le rilevazioni in situ dovrebbero essere eseguite su più tipologie di superfici del materiale che è stato esposto a incendio. In questo modo, avendo una sorte di "gradiente" microstrutturale, si può ricostruire la storia dell'incidente che potrebbe essersi verificato.

Nel caso in cui i risultati ottenuti non siano soddisfacenti, è necessario ricorrere a prove distruttive per analizzare l'andamento della microstruttura lungo lo spessore del metallo, il tutto affiancato da altrettante prove meccaniche per la resistenza a snervamento, bending, resilienza, tenacità e via dicendo. Laddove sia necessario asportare materiale per analizzarlo in laboratorio, l'appendice in questione richiede che sia effettuata una FFS per dimostrare che la rimozione di tale parte non comporti cedimenti strutturali.

A questo punto si procede per la valutazione dell'integrità metallografica nel seguente modo:

- Selezione dell'attrezzatura e del componente soggetti ad analisi: individuata la zona affetta da alterazioni, si seleziona una griglia di prelievi che prevede sia zone di materiale base che termicamente alterate;
- 2. Selezione del metodo di campionamento: valutare se è sufficiente l'asportazione della superficie del metallo, altrimenti procedere al prelievo di profili di spessore;
- 3. Preparazione della replica metallografica: lucidatura della superficie, applicazione di acido per evidenziare la microstruttura eccetera (si veda appendice X);
- Prove di durezza: selezionare almeno cinque zone per la misura. Se in una parte sono presenti il metallo base, la zona affetta da alterazione e la saldatura, si effettui cinque misure per ogni zona;
- Campionare i sezionamenti rimossi (opzionale): nel caso in cui sia necessaria l'asportazione di materiale, valutare il suo trasporto e il suo completo report dalla zona di rimozione.

Si mostrano, dunque, le prove metallografiche effettuate nella colonna C-206.

6.5.2.1 Esame metallografico mediante replica

La virola IV, che presenta una deformazione provocata da possibile incendio, è costituita di Fe 42.1 secondo norma UNI EN 5869:1965. Tale acciaio può essere correlato nelle rispettive normative elencate nella tabella sottostante:

Norma UNI EN 5869:1965 ASTM/ASME Sec. II-D UNI EN 10028:2	Nomencl.	Fe 42.1	SA285 Grade C	P235GH
	Norma	UNI EN 5869:1965	ASTM/ASME Sec. II-D	UNI EN 10028:2

Tabella 10: nomenclatura dell'acciaio secondo differenti norme

Questo acciaio al carbonio è un tipico materiale utilizzato per la produzione di vessels in pressione, come affermano le norme EN 13445-2 e 12953-2. Si riporta dunque la sua composizione chimica.

Composizione chimica													
Al	С	Cr	Cu	Mn	Mo	Ν	Nb	Ni	Р	S	Si	Ti	V
≤0 , 02%	≤0,16	≤0,3	≤0,3	0,6-1,2	≤0,08	≤0,012	≤0,03	≤0,3	≤0,025	≤0,01	≤0,35	≤0,03	≤0,02

Tabella 11: composizione chimica dell'acciaio Fe-42.1

Il prelievo della replica metallografica è stato effettuato nel periodo di giugno 2022 da società conto terzi mediante meccanismo di pulizia TransPol-5 e utilizzando come carte abrasive P120, P240, P600 e P1200 e appositi panni di lucidatura. Le immagini della posizione a cui fa riferimento ciascuna replica sono state acquisite con fotocamera digitale Nikon modello D5000, mentre il microscopio, sempre della casa di produzione Nikon è il modello Eclipse L150.

Poiché lo standard API 579 prevede l'analisi di più zone metallografiche al fine di avere una buona distribuzione dei risultati ottenuti, è stato asportato del materiale sia dove esso non è stato soggetto a innalzamento di temperatura e sia nella zona termicamente alterata, incluse le saldature.

Sui medesimi campioni sono state effettuate anche le prove di durezza secondo la metodologia Vickers, consentendo così di poter osservare l'andamento della variazione delle proprietà meccaniche, come la resistenza ultima a rottura in funzione della diversa microstruttura che presenta il metallo a seguito di alterazione.

Si è considerato utile, inoltre, misurare indicativamente la grandezza dei grani per valutare i loro ingrossamenti rispetto al metallo base. La norma UNI EN 2624 prevede di disegnare due diagonali nella prova metallografica ottenuta e contare i bordi grani intercettati.

L'ingrandimento in micrometri ci avrebbe consentito di conoscere la lunghezza della diagonale così da poterla correlare al numero di bordi grani. Le nostre prove possiedono, invece, solamente il dato dell'ingrandimento ottico (M). Si riporta, nell'immagine sottostante, un esempio di metallografia acquisita con software dove è stata applicata la norma citata in precedenza.



Figura 59: analisi quantitativa della dimensione media dei grani

Dall'analisi dell'immagine si rileva che la lunghezza della diagonale L è pari a 390 micrometri, grazie alla conoscenza dell'ingrandimento, mentre i bordi di grano intercettati sono 16+17. La dimensione media dei grani è pari a 2L/N, ossia (390+390)/(16+17) = 24 μ m. Non conoscendo le dimensioni in micrometri dell'ingrandimento, è stato scelto di optare per un'altra normativa, ossia la ASTM E112-13 col corrispettivo metodo Abrams:

- 1. Disegnare tre circonferenze di dimensione nota, ad esempio 2 cm, 4 cm e 6 cm;
- 2. Misurare la lunghezza totale delle circonferenze: $L_T = \pi \cdot 2 + \pi \cdot 4 + \pi \cdot 6$
- 3. Contare quante intersezioni si incontrano nelle circonferenze (Nt);
- 4. Usare la formula ASTM per ottenere la dimensione dei grani.

Si riporta, di seguito, una tabella riassuntiva delle posizioni esaminate:

Sigla della replica	Posizione di prelievo	Elemento	Esito dell'esame meta	llografico	Durezze HV	Sp. Prima /dopo. mm	Classif. danno microstr.	Classif. danno da creep	Foto N°
R1	Materiale Base IV° Virola	Materiale Base zona integra	Assenza di danneggiamento micro strutturale. Struttura costituita da grani di ferrite e perlite in presenza di carburi.		98 102 101	N.A.	A	1	1-2
R2	Materiale Base IV° Virola	Materiale Base Zona di transizione	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura cos grani di ferrite e perlite in di carburi.	ento micro tituita da n presenza	105 108 109	N.A.	А	1	3-4
R3	Materiale Base IV° Virola	Materiale Base zona calda	Assenza di danneggiamento micro strutturale. Struttura costituita da grani di ferrite e perlite in presenza di carburi. Si apprezza leggero ingrandimento dei grani rispetto alle zone precedentemente osservate.		95 93 94	N.A.	A	1	5-6
		Materiale Base IIIº Virola	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura cos grani di ferrite e perlite in di carburi.	ento micro tituita da n presenza	94 91 92		A	1	7-8
		ZTA IIIº Virola	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura a gi costituita da ferrite in pre carburi.	ento micro rano fine esenza di	97 89 100	N.A.	Α	1	9-10
R4	Saldatura di composizione tra III° e IV° Virola	Zona Fusa	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura den solidificazione in presen carburi.	ento micro Idritica di za di	111 112 110		Α	1	11-12
		ZTA IV° Virola	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura a gi costituita da ferrite in pre carburi.	ento micro rano fine esenza di	97 95 99		А	1	13-14
		Materiale Base IV° Virola	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura cos grani di ferrite e perlite in di carburi	ento micro tituita da n presenza	89 91 90		Α	1	15-16
R5	Materiale Base IV° Virola	Materiale Base zona calda fascia altra	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura cos grani di ferrite e perlite in di carburi.	ento micro tituita da 1 presenza	120 118 107	N.A.	A	1	17-18
		Materiale Base IIIº Virola	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura cos grani di ferrite e perlite in di carburi.	ento micro tituita da n presenza	114 133 122		A	1	19-20
	Saldatura di	ZTA IIIº Virola	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura a g costituita da ferrite in pre carburi.	ento micro rano fine esenza di	115 118 110		A	1	21-22
R6	R6 tra III° e IV° Virola Fascia calda	Zona Fusa	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura der solidificazione in presen carburi.	ento micro Idritica di za di	120 123 122	N.A.	A	1	23-24
	ZTA IV° Virola	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura a g costituita da ferrite in pre carburi.	ento micro rano fine esenza di	120 121 109		А	1	25-26	
		Materiale Base IV° Virola	Assenza di danneggiam strutturale. Struttura cos grani di ferrite e perlite in di carburi	ento micro tituita da n presenza	97 110 107		Α	1	27-28
	Data di prelievo: Giu	ano 2022	Prelievo:						
		.	Valutazione:						

Tabella 12: posizioni di analisi per l'esame metallografico



Figura 60: zona di prelievo R1

Replica:	R1	Fotografia N°	1			
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	200X			
Posizione:	Materiale ba	Materiale base IV virola zona integra				
Esito:	Assenza di danneggiamento micro strutturale. Struttura costituita da grani di ferrite e perlite in presenza di carburi.					



Figura 62: analisi metallografica 200X



Figura 64: dimensione dei grani



Figura 61: zona di prelievo R1

Replica:	R1	Fotografia N°	2		
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	500X		
Posizione:	Materiale base IV virola zona integra				
Esito:	Come la precedente. Particolare a maggiore ingrandimento.				



Figura 63: analisi metallografica 500X

1° Circle	D (cm)	4	
	N. of Inter.	13	
2° Circle	D (cm)	8	
	N. of Inter.	29	
3° Circle	D	12	
	N. of Inter.	48	
Nt	90		
Lt (cm)	75,4		
Μ	500		
G	8,43		
	8,5		
ASTM	8	9	8,5
Size (mm)	0,022	0,016	0,019

Tabella 13: dimensione dei grani



Figura 65: zona di prelievo R2

Replica:	R2	Fotografia N°	3
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	200X
Posizione:	Materiale base IV	[°] virola zona transizio	one calda
Esito:	Assenza di danneggiamento micro strutturale. Stru		

Esito: Assenza di danneggiamento micro strutturale. Struttura costituita da grani di ferrite e perlite in presenza di carburi.



Figura 67: analisi metallografica 200X



Figura 69: dimensione dei grani



Figura 66: zona di prelievo R2

Replica:	R2	Fotografia N°	4			
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	500X			
Posizione:	Materiale	Materiale base IV° virola zona transizione calda				
Esito:	Come la precedente. Particolare a maggiore ingrandimento.					



Figura 68: analisi metallografica 500X

1° Circle	D (cm)	4	
	N. of Inter.	15	
2° Circle	D (cm)	8	
	N. of Inter.	28	
3° Circle	D	12	
	N. of Inter.	48	
Nt	91		
Lt (cm)	75,4		
Μ	500		
G	8,46		
	8,5		
ASTM	8	9	8,5
Size (mm)	0,022	0,016	0,019

Tabella 14: dimensione dei grani



Figura 70: zona di prelievo R3

Replica:	R3	Fotografia N°	5
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	200X
Posizione:	Materiale base IV ^o	Virola, vertice bugna	, zona calda

Esito: Assenza di danneggiamento micro strutturale. Struttura costituita da grani di ferrite e perlite in presenza di carburi. Si apprezza leggero ingrandimento dei grani rispetto alle zone precedentemente osservate



Figura 72: analisi metallografica 200X



Figura 74: dimensione dei grani



Figura 71: zona di prelievo R3

Replica:	R3	Fotografia N°	6			
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	500X			
Posizione:	Materiale	Materiale base IV° Virola, vertice bugna, zona calda				
Esito:	Come la precedente. Particolare a maggiore ingrandimento.					



Figura 73: analisi metallografica 200X

1° Circle	D (cm)	4
	N. of Inter.	8
2° Circle	D (cm)	8
	N. of Inter.	13
3° Circle	D	12
	N. of Inter.	21
Nt	42	
Lt (cm)	75,4	
Μ	500	
G	<mark>6,2</mark> 3	
	6	
ASTM	6	
Size (mm)	0,045	

Tabella 15: dimensione dei grani



Figura 75: zona di prelievo R4

Replica:	R4	Fotografia N°	7
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	200X
Posizione:	Materiale ba	se III Virola	
Faiter	Assessed in deservations and a minute should use a		

Esito: Assenza di danneggiamento micro strutturale. Struttura costituita da grani di ferrite e perlite in presenza di carburi.



Figura 77: analisi metallografica 200X



Figura 79: dimensione dei grani



Figura 76: zona di prelievo R4

Replica:	R4	Fotografia N°	8		
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	500X		
Posizione:	materiale	base tubo III Virola			
Esito:	Come la p Particolare	Come la precedente. Particolare a maggiore ingrandimento.			



Figura 78: analisi metallografica 500X

1° Circle	D (cm)	4
	N. of Inter.	9
2° Circle	D (cm)	8
	N. of Inter.	23
3° Circle	D	12
	N. of Inter.	44
Nt	76	
Lt (cm)	75,4	
Μ	500	
G	7,94	
	8	
ASTM	8	
Size (mm)	0,022	

Tabella 16: dimensione dei grani

Replica:	R4	Fotografia N°	9
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	200X
Posizione:	ZTA III Virola		

Esito: Assenza di danneggiamento micro strutturale. Struttura a grano fine costituita da ferrite in presenza di carburi.



Figura 80: R4-2 analisi metallografica 200x



Figura 82: dimensione dei grani

Replica:	R4	Fotografia N°	10	
Attacco:	Nital	Ingrandimento:	500X	
Posizione:	ZTA III Virola			
Esito:	Come la precedente.			

Come la precedente. Particolare a maggiore ingrandimento.



Figura 81: R4-2 analisi metallografica 500x

			-
1° Circle	D <mark>(</mark> cm)	40	cm
	N. of Inter	15	
2° Circle	D (cm)	80	cm
	N. of Inter	25	
3° Circle	D	120	cm
	N. of Inter	41	
N _t inter.	81		
Lt	754,0	mm	
М	500		
NL	53,71	1/mm	
λ	0,01862	mm	
G	8,21		-
	8		
ASTM	8		
Size (mm)	0,022		

Tabella 17: dimensione dei grani

ASTM Number	Size (mm)	Size (In.)
1	0.250	0.010
2	0.180	0.007
3	0.130	0.005
4	0.090	0.0035
5	0.065	0.0025
6	0.045	0.0018
7	0.030	0.0012
8	0.022	0.0009
9	0.016	0.0006
10	0.011	0.0004
11	0.008	0.0003

Tabella 18: conversione da ASTM a mm



Figura 83: zone di prelievo

Nella zona di analisi R3, è possibile osservare una metallografia che presenta dei grani decisamente più grandi. Ad esempio, i campioni prelevati lontano dalla regione alterata, come R1, hanno un valore medio dei grani pari a 0.019 mm, mentre il campione R3 riporta una sima di 0,043 mm, più del doppio.

Un surriscaldamento prolungato e locale del materiale ad elevata temperatura per un tempo sufficiente può aver causato l'ingrossamento dei grani. Lo studio del meccanismo di azione dal punto di vista metallografico esula però lo scopo della tesi.

Tuttavia, le analisi precedenti possiamo confermare che l'ipotesi più probabile sia stata proprio un innalzamento di temperatura che ha provocato una combustione interna, deformando la IV Virola.

6.6 Analisi della deformazione con scanner 3D

Lo standard 579 consiglia, come già accennato nel paragrafo 6.4.1, di effettuare scansioni tridimensionali per valutare la verticalità e la deformazione della colonna.

La società conto terzi, nel periodo compreso tra il 20/04/2023 e il 29/05/2023, ha effettuato anche altre tipologie di prove, consentendo così di ottenere le seguenti informazioni:

- Verifica dei collegamenti della colonna nel basamento attraverso esame difettoscopico con ultrasuoni dei 20 tirafondi di ancoraggio. Prelievo di un campione di calcestruzzo attraverso carotaggio continuo del basamento e prove di compressione in laboratorio per la valutazione della resistenza meccanica del CLS e dello strato di carbonatazione;
- Verifica con sistema Phased Array UT le due saldature circonferenziali e longitudinali di composizione della virola per una lunghezza totale di 23,84 m;
- Verifica della verticalità della colonna e rilevazione della deformazione. Tale attività è stata effettuata in un primo momento con colonna coibentata in assenza di ponteggi, dal basamento alla testa della colonna, mentre in secondo tempo sono state acquisite le informazioni della virola deformata nella sua lunghezza a 360°;

6.6.1 Integrità dei fondi

La verifica di integrità dei tirafondi è stata effettuata con una strumentazione difettoscopica ad ultrasuoni di tipo digitale, marca Sonatest modello 700M corredato di sonda monocristallo da 2.5 MHz. L'operatore ha effettuato ispezioni attraverso una prospezione longitudinale, verificando così l'integrità di ogni singolo tirafondo di cui è stata determinata la corrispettiva lunghezza osservabile nella successiva tabella.

Tirafondo	Esito del controllo sul	Lunghezza misurata
	titrafondo	(mm)
1	integro	1279
2	integro	1219
3	integro	1280
4	integro	1279
5	integro	1279
6	integro	1280
7	integro	1280
8	integro	1281
9	integro	1280
10	integro	1280
11	integro	1279
12	integro	1280
13	integro	1280
14	integro	1279
15	integro	1280
16	integro	1280
17	integro	1282
18	integro	1280
19	integro	1280
20	integro	1279

Tabella 19: elenco dei tirafondi



Figura 84: prelievo della carota di analisi



Figura 85: vista verticale dei tirafondi

In conclusione, tutti i tirafondi sono risultati integri.

Per verificare invece le caratteristiche meccaniche di resistenza del calcestruzzo costituente il basamento e la fondazione della colonna, è stata estratta una carota di analisi, la quale è stata successivamente inviata a un laboratorio certificato per la prova di compressione. Per l'estrazione del campione cilindrico di calcestruzzo è stata utilizzata una specifica carotatrice con carotiere con diametro di 80 mm e lunghezza di 500 mm. La prova di compressione in laboratorio su campione cilindrico ha restituito un valore di 28,7 N/mm².



Figura 86: prelievo del campione di analisi



Figura 87: estrazione della carota di analisi



Figura 88: zona di estrazione della carota



Figura 89: carota di analisi

Si riporta, di seguito, il certificato di conformità rilasciato dal laboratorio di analisi.

Sperimentazione sulle Strutture e sui Materiali da Costruzione Autorizzato ai sensi dell'art. 20 Legge 1086/71 con D.M. 415 del 01/12/2020

Certificato nr.	Data:	16/05/2023	Natura dei campioni:	Carote in cls
Protocollo:	Data:	21/04/2023	Data della prova:	06/05/2023
Verb. accettazione nr:	Data;	21/04/2023	Consegna in Laboratorio:	21/04/2023
Oggetto dei lavori;	Verifica	consistenza basamento in	CLS C-206 Sasol stabilimento di Augusta (SR).
Ubicazione Cantiere:				
Richiedente:				
Direttore dei Lavori:	1			
mpresa:	1			
Proprietario / Ente appaltante:	1			
Direttore di Stabilimento/Produzione:	1			
Collaudatore / Tecnico Verificatore:	1			
Campioni consegnati da:	-			
La lettera di richiesta:	Non re	ca la firma del Direttore	dei Lavori (non costituisce certificato ai	fini della L.1086/71)

CERTIFICATO DI PROVA

	Caratteristiche di prelievo			peso provino	Dimen cilindi	sioni dei 1 in mm	regolazio ne	area compressa	tipo rottura	carico rottura	Tensione	Massa volumica	
N°	sigla	data prelievo	n. verb. Prelievo	Ubicazione	(g)	ø	h	provini *	mm2.		kN	N / mm2	kg / m3
1	C1	20/04/2023	=	Basamento C-206	662,0	74,0	73,9	s	4300,84	N	123,40	28,7	2083,9

Rif. DM 17/01/2018 Resistenza a compressione su carote di calcestruzzo indurito - UNI EN 12390-3 Determinazione massa volumica calcestruzzo indurito - UNI EN 12390-7(***)

I prelievi dei campioni di calcestruzzo risultano essere conformi a quanto previsto dal 5 11.2.2 del DM 17/01/2018 in quanto eseguiti e certificati da

Laboratorio Autorizzato di cui all'art. 59 del DPR 380/2001 mediante Sperimentatori in organico comunicato al STC.

* s: provino sottoposto a spianatura; c: provino sottoposto a cappatura con miscela di zolfo e silicio.

** An: Anomala (tipologia A...K); N: Normale.

*** Condizione per la determinazione del volume: mediante calcolo a partire da misura effettive.

MACCHINA DI PROVA:

RMU da 600 kN inv. N° 532

Controls da 250 kN inv. Nº 39

Il Direttore del Laboratorio

x

6.7 Controllo difettoscopico delle giunzioni con Phased Array UT

Il metodo di ispezione a ultrasuoni prende il nome dal fatto che sfrutta vibrazioni con una frequenza superiore al limite dell'udito umano (oltre 20 MHz). Questo metodo si basa sull'uso di apparecchiature specializzate che generano onde ultrasonore, le quali, pur essendo di natura meccanica, presentano caratteristiche analoghe a quelle del suono.

Le onde ultrasonore si originano quando un mezzo elastico subisce una deformazione a seguito di una sollecitazione esterna. La parte del corpo direttamente coinvolto inizia a oscillare, trasmettendo l'energia alle zone circostanti e permettendo così la propagazione dell'onda. In generale, tutti i materiali, quando sottoposti a una forza esterna, subiscono uno spostamento delle loro particelle rispetto alla posizione di equilibrio. Nei mezzi elastici, questo fenomeno genera vibrazioni che si trasferiscono progressivamente agli strati adiacenti, dando origine alla propagazione dell'onda attraverso il materiale.

A differenza delle onde elettromagnetiche, quelle meccaniche necessitano quindi di un mezzo di propagazione che in questo caso risulta dunque essere il metallo da analizzare.

Vi è da specificare, in particolare, che la direzione di propagazione di un'onda ultrasonora e la direzione di vibrazione delle particelle nel mezzo sono indipendenti tra loro. Questo fatto consente di identificare diversi tipi di onde, a seconda dei modi in cui l'oscillazione delle particelle può avvenire.

Nei controlli non distruttivi si utilizzano principalmente onde longitudinali (o di compressione) e trasversali (o di taglio). Nel primo caso, la direzione di vibrazione delle particelle è parallela a quella di propagazione dell'onda stessa, mentre quelle trasversali hanno una direzione perpendicolare a quella di propagazione dell'onda.



Altre tipologie di onde sono tuttavia utilizzate per i controlli non distruttivi che prevedono ultrasuoni. Vi sono, ad esempio, le onde superficiali che si propagano appunto nello strato superficiale dei solidi, dove la direzione di vibrazione delle particelle varia, con continuità, da parallela a perpendicolare secondo un cammino ellittico. Tali onde possono propagarsi lungo tutta la superficie del solido, essendo riflesse alle estremità e ritornare al punto di partenza, a meno che non incontrino bruschi ostacoli. Le onde di Lamb (o piatte), invece, si generano quando un'onda ultrasonora si propaga in mezzi di spessore confrontabile con la lunghezza d'onda impiegata.

I parametri principali delle onde concernono la velocità di propagazione, la frequenza, la lunghezza d'onda, l'impedenza, la pressione e l'intensità acustica. Così, attraverso le leggi fisiche della riflessione e della rifrazione, le cui onde sono appositamente rilevate mediante sonda, è possibile analizzare i difetti presenti nelle saldature.

In particolar modo, l'apparecchio utilizzato è dotato di un trasduttore che serve a convertire le oscillazioni elettriche in vibrazioni meccaniche. Tale elemento funziona sia da trasmettitore che ricevitore e può essere sia piezoelettrico che elettrostrittivo.

Per verificare dunque l'integrità delle giunzioni saldate sia circonferenziali che longitudinali della IV virola è stata utilizzata la tecnica avanzata del Phased Array che vede l'impiego di molteplici trasduttori. In particolar modo è stato utilizzato uno strumento marca Sonatest modello VEO a 16:32 canali accoppiato ad una sonda con 16 elementi e 5 MHz di frequenza.

Per la sua analisi a 360° tale attrezzatura è stata montata su uno speciale carrello con encoder della Jureh modello Microbe, visibile nella figura sottostante.



Figura 92: Sonatest VEO



Figura 93: Jureh Microbe

Il risultato del controllo, purtroppo, è stato parzialmente condizionato dalle condizioni delle superfici sensibilmente attaccate da una condizione di corrosione da sottocoibente. Al fine di ottenere una migliore analisi, tali estensioni sono state regolarizzate attraverso un'accurata azione di smerigliatura superficiale eseguita da ditta incaricata dalla stessa committente. Dove non è stato possibile garantire un sufficiente accoppiamento sonda-superficie con il sistema Phased Array, vi è stato applicato il controllo difettoscopico tradizionale garantendo comunque una completa ispezione delle saldature interessate.

Per una migliore gestione dei files di acquisizione le giunzioni circonferenziali sono state parzializzate in 4 parti, 0°-90°, 90°-180°, 180°-270°, 270°-360

Di seguito uno schema semplificato dei controlli UT eseguiti e le zone di analisi:

lato	tecnica
Α	UT
В	Phased Array UT
Α	Phased Array UT
В	UT
Α	UT
В	Phased Array UT
Α	UT
В	UT
	lato A B A B A B A B B

Tabella 20: elenco delle saldature analizzate



Figura 94: analisi Phased Array delle saldature circonferenziali



Figura 95: zone di analisi dei controlli UT

Si riporta, di seguito, il risultato ottenuto di tale analisi, dove è possibile osservare che non sono state rilevate particolari zone di interferenza.

Si può quindi concludere che le saldature sono sostanzialmente integre.

	CONTROLLO CON LILTRASLIONI TECNIC	Data: 29 / 5 / 2023 △ Cert. nº: 198-2023
	SEMI-AUTOMATICA PHASED ARRAY	Foglio: 2 di 4
		Commessa interna: 20-2023
	Immagini dei risultati ottenuti	
	WELD C1 lato B tratto 0°-90°	
2: 51 - Sectorial PE Top View 0.31 - 0.31 - 0.3 - 0.3 - 0.5 - 0.31 - 0.31 - 0.5 - 0.3 - 0.5		2
(3: 3.5%		8
5. -		
C2: 2.7%		
14.99 mm		
E2: 3.4%		-
19.13 mm		
	WELD C1 lato B tratto 90°.180°	
5: 51 - Sectorial PE Top Vew , 0.31, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5,	06, 07, 08, 09, 0 , 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	, р.9, р., <u>р.1, р.2, р.3, р.4, р.</u>
CP: 15.3%		
E2: 10.3%		
ā (2: 4.0%)		
16.96 mm		
19.13 mm	the state of the sector of the second second second second second second second second second second second sec	
	WELD C1 lato B tratto 180°-270°	
8: 51 - Sectorial PE Top View 	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, p., p.t. p.2, p.3, p.4, p.5, p.6, p.7, p.8	🗖 🕷 . . μ.9, β, β.1, β.2, β.3, β.4, β.
C3: 1.9%		
E2: 2.0%		
C2: 2.6%		3
19.13 nm		
	WELD C1 lato B tratto 270°-360°	
11: S1 - Sectorial PE Top View 0.1m 0.2 0.3 0.4 0.5		🗖 🗶
C3: 4.3%		
E2: 3.5%		
C2: 5.2%		3
19.13 mm	an a chuire ann an ann an an ann an Ar ann an Ar ann an Ar ann an Ar	
Tecnico incaricato	Supervisore	Cliente/Ispettore del Cliente

		Data: 29 / 5 / 2023									
COL	NTROLLO CON ULTRASUONI TECNICA	A Cert. n°: 198-2023 Foglio: 3 di 4									
S	EMI-AUTOMATICA PHASED ARRAY	nº Allegati: /									
	Immagini dei risultati ottenuti	Commessa interna: 20-2023									
	WELD C2 lato B tratto 090-										
0.1m 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0. nt and and and a databased on the fraction for the state of the sta	.7 այն ավարում այնու նակությունը կեն, ու են անանակությունը կեն, լե7	1									
G3: 4.5%		28 2									
12.55 mm											
E2: 2.7%											
F											
(2:3.2%)											
19.13 mm 365.02 mm											
WELD C2 lato B tratto 90°.180°											
C: 13%	a da da da da da da da da da da da da da	in de ale ale ale ale ale ale ale ale ale al									
0.50%											
E2: 3.6%		<mark>20</mark>									
16											
C2: 4.0%											
17.57 mm 19.13 mm											
	WELD C2 lato B tratto 180°-270°										
8: 51 - Sectorial 70 Tep View	7. 68. 69. 6. 11. 11.2. 11.3. 64. 11.5. 65. 67. 11.8	1.9, 2, 01, 02, 03, 04, 0									
	intentini territari fan hadi intentini territa ha fini territa de fini de afini de afini de afini										
C3: 1.2%											
E2: 0.8%											
		-8									
C2: 1.2%											
19.13 mm	a second and a second second second second second second second second second second second second second second	1000									
	WELD C2 lato B tratto 270°-360°										
11:51-Sectral R Teo Verv											
at 0.15 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.1	7	had ^{1,9} had a faith of the fai									
C3: 1.2%											
12.59 mm											
- C2: 2.7%											
		3									
19.13 mm											
Tecnico incaricato	Supervisore	Cliente/Ispettore del Cliente									

Ipertec s.r.l.

CONTROLLO CON ULTRASUONI TECNICA SEMI-AUTOMATICA PHASED ARRAY

 Data:
 29
 5
 2023

 Cert. n°:
 198-2023

 Foglio:
 4
 di
 4

 n° Allegati:
 /
 .
 .

 Commessa interna:
 20-2023
 .

Immagini dei risultati ottenuti									
WELD L1 lato B									
14 S1 - Sectorial PE Top View									
	7 and in the dealer of a shade when the two loss to a fee	ան նաև տեղական նա նանուն մեր հայտների անտես ներ հայտներին հայտներին հայտներին հայտներին հայտներին հայտներին հա							
G3: 3.3%									
E2: 4.0%									
14.98 mm									
- C1: 4.2%									
Calco Tomar or		3							
19.13 mm									
Tecnico incaricato	Supervisore	Cliente/Ispettore del Cliente							

			C	ONTI	ROLL	.0 CC	DN U	JLTR	ASUC	DNI T	ECN	ICA	Data: 2	9 / 5	/ 20)23
SEMI-AUTOMATICA PHASED									Foglio:	1 c	li -	4				
										n° Allegati:	_	/				
	АККАҮ									Commessa int	erna:					
							dati	i gener	rali							
Cliente:					0	rdine n°:					Lu	logo:		Augusta		
Impianto/Item:								Oggetto	Disegno	: Giun	ti IV viro	la C-206				
Materiale:			Carbo	n Steel				WPS:					N.A.			
Marca/N.F./ID:			N.A.				Dimensi	ioni:		da dise	gno		Tempe	eratura °C:	2	20
					d	ati spec	ifici ine	erenti l	a metoo	lologia						
Procedura:	ITE 44 r	ev1 del	27/02/2	021	Speci	ifica/Norr	na/Stan	dard/Co	dice di rife	erimento	:		EN ISO 1	3588		
Criteri di Accettat	oilità:		UNI E	EN ISO	19285:20	017	I	Livello o	di riferime	nto:			livello 3			
Marca Strumenta	zione:	Son	atest	Modell	ello: VEO 16:64 S			S/N:	N: 1009840 Verificata il:							
Marca Trasduttor	e:	IM	G	Modell	lo:	AT2569	в ;	S/N:	N: 1213-6448 Frequen		quenza	(MHz):	5 Elementi:	16 Pich	(mm):	0,5
Marca Zoccolo:		IMG		Modell	lo: IA1	I-N60S-I	HC	S/N:	/ Angolo di			taglio:	38,5°			
Marca Scanner.		Jureh		Modell	lo:	Microbe		S/N:	9494	S	oftware:		UT S	Studio		
Blocco di Calibra:	zione:		Phased	Array B	lock 1	Bloc	co di Ri	iferimer	nto:	1	oro 2,5	mm	Accop	piante:	acqu	a
Regolazione del	la Sensib	oilità:	T.C.G	9. Li	vello di S	Sensibili	tà (dB):	80	% Per	dite di T	rasferim	ento (dB)	: N.A.			
Numero di Scan	sioni:	/ (Descrizio	ne delle	scansior	ni:		singo	olo lato de	ei giunti	BW		Scan plan a	llegato:	si	
						Reg	istrazio	oni e va	alutazio	ni						
Saldatura:	Scan:	ID:	Direz. fascio	Angolo (°):	Dist. "0" (mm):	Lungh. (mm):	pos.ne +Y/-Y	Prof. Min. (mm):	Prof. Max. (mm):	Ampl. (dB) +/- ref. Liv.	Tipologia P/V	esito C/NC		note		
weld C1	0-90											С		lato B		
weld C1	90-180											С	lato B			
weld C1	180-270											С	lato B			
weld C1	270-360											С	lato B			
weld C2	0-90											С	lato B			
weld C2	90-180											С	lato B			
weld C2	180-270											С	lato B			
weld C2	270-360											С	lato B			
weld L1	0-2500											С	lato B			
												scan p	lan			
					Beam d	irection										
			↓ +Y		18	30						15.00				
0 Weld 0 an						- 270			_							
Location		axis	Posi	ition					-							
			¥−Y		()										
Osservazioni:																
Tec	nico incar	ricate			Supervisore							Cliente/Ispettore del Cliente				
iec							Supe						silence ispecto		-	

6.8 Scanner 3D per la verifica della verticalità e della deformazione locale della IV virola

Attraverso l'utilizzo della tecnologia Laser Scanner 3D è stato possibile verificare la verticalità della colonna e, successivamente, dopo la rimozione del coibente della zona interessata, anche la cilindricità della virola 4 interessata da deformazione.

Per la verifica della verticalità, le attività eseguite consistono nel rilevamento in campo di tutte le superfici visibili della colonna ai diversi orientamenti, la costruzione di un modello 3D da nuvola di punti, la realizzazione di una mesh dettagliata e l'estrazione di un cilindro di riferimento derivato dalla modellazione. Benché il rilievo sia stato eseguito con la colonna in esercizio e coibentata, si ritiene affidabile il controllo di verticalità in quanto la sua snellezza in estensione non può travisare un eventuale inclinazione indotta dal danno precedentemente menzionato. Infatti, eventuale distorsione avrebbe ridondanza sulla superficie coibentata. Puntuali verifiche sono comunque state eseguite sulle uniche parti scoperte, ovvero le flange delle connessioni alle linee e i passi d'uomo.

Il rilievo è stato eseguito dal piano di campagna e dalle passerelle di servizio, anche se vi è da precisare che la limitata accessibilità lato est, a causa della presenza di altre strutture adiacenti alla colonna, ha originato coni d'ombra che sono stati ridimensionati con l'esecuzione di molteplici stazioni con distanze di campionamento abbastanza ridotte. Per la precisione, sono state necessarie 11 stazioni di acquisizione. Il controllo è stato eseguito con impianto in marcia e la qualità del rilievo è stata leggermente influenzata dalle vibrazioni prodotte dalle apparecchiature in esercizio.

Lo strumento utilizzato è uno scanner LEICA Scan Station P40 il quale possiede le seguenti caratteristiche:

- Velocità di acquisizione: superiore a 1.000.000 punti/sec
- Campo di misura: 120/240 m con albedo del 90%
- Accuratezza: 1,2 mm + 10 ppm su tutto il range
- Accuratezza angolare: 8" orizzontale e verticale
- Rumore strumentale massimo a 10 m: 0,4 mm rms
- Rumore strumentale massimo a 50 m: 0,5 mm rms

- Errore lineare fino a 50 m di distanza: ≤ 2 mm
- Campo di scansione orizzontale: 360°
- Campo di scansione Verticale: 290°

È stata dunque prodotta una rete di stazionamenti attorno alla colonna utilizzando i piani di servizio con i relativi ponteggi. Tutte le nuvole di punti rilevate dalle singole stazioni sono state opportunamente registrate ed analizzate come unico modello 3D.

La maglia di rilievo è stata mantenuta molto fitta, realizzando delle acquisizioni con frequenza millimetrica.



Figura 96: immagine della nuvola di punti grezza colonna C-206



Figura 97: immagine della mesh confrontata con il cilindro ideale



Figura 98: analisi di verticalità della colonna C-206



Figura 99: analisi dimensionale da cui si nota che il 97% dei punti rientra in un range di +/- 40 mm

Il controllo di verticalità è risultato conforme, rientrante nei limiti L/200 considerati per un vessel con rapporto L/D maggiore di 10.

Per quanto concerne il rilievo eseguito sulla IV virola è stato sviluppato un apposito report di analisi, allegato a questa relazione. Di seguito riportiamo alcune immagini estratte dal controllo in campo.



Figura 100: analisi tridimensionale della IV virola



Figura 101: analisi tridimensionale della IV virola vista nord



Figura 102: analisi di forma, massima deviazione 31 mm



Figura 103: analisi di forma della IV virola, rolling di tutta la superficie

Il controllo di forma ha evidenziato la deformazione localizzata, oggetto delle indagini, con un valore massimo puntuale di 31 mm. questa deformazione si è tradotta in una generale ma leggera ovalizzazione della sezione di virola con uno scarto di +25/-27 mm rispetto al cilindro ideale.

La norma ASME BPVC Section VIII Div. 1 riporta una sezione dedicata all'eventuale non conformità di tale deformazione. In particolar modo, la differenza tra il diametro interno minimo e massimo in ogni sezione della colonna non deve superare l'1% del valore nominale.

Nel caso in cui la misura sia stata effettuata dall'esterno, si deve naturalmente tener conto dello spessore delle lamiere.



Figura 104: tolleranza di deformazione

Qualora invece una sezione sia attraversata centralmente da un'apertura, la differenza permessa sale ad un valore tollerabile pari al 2%.

In mancanza di diverse indicazioni, riferendoci a quanto riportato nelle ASME Sez. VIII Div.1 UG-80, a progetto è ammessa una deviazione sulla circolarità della sezione cilindrica pari all'1% che, nel nostro caso, avendo un diametro esterno di 3,0173 mm sarebbe pari a 30 mm, valore di tolleranza superiore a quanto riscontrato in campo.



Figura 105: scanner tridimensionale della colonna C-206
Tank definition

Elevation marker: X= -2.01633 m; Y= -1.78634 m; Z= -0.56621 m Orientation marker: X= -0.22567 m ; Y= 0.02475 m ; Z= 16.06626 m Tank height: 40 m

Best cylinder computation Number of points: 498410

Distance of worst point: 0.27862 m Standard deviation: 0.02224 m Cylinder axis: X= -0.00117 m; Y= 0.00172 m; Z= 1 m Cylinder diameter: 3.16545 m

Plumbness computation Measured plumbness: 0.069 m

Tolerance: 0.127 m (according to API 653)



Figura 106: scanner tridimensionale della colonna C-206

Angolo della sezione (°)	Raggio medio (m)	Raggio min. (m)	Raggio max. (m)
0	1.60869	1.56027	1.69098
25	1.6137	1.5543	1.86203
50	1.58037	1.55357	1.8563
75	1.6974	1.53376	1.87682
100	1.60496	1.54693	1.9061
125	1.65539	1.55657	1.91477
150	1.58717	1.55707	1.94278
175	1.65719	1.53271	1.856
180	1.6467	1.54281	1.86809
205	1.61833	1.52896	1.83888
230	1.61879	1.41551	1.84868
255	1.6119	1.42345	1.80002
280	1.59292	1.48466	1.6534
305	1.60346	1.52122	1.63123
330	1.59173	1.56519	1.6221
355	1.58887	1.56497	1.72195

Tabella 21: raggi in funzione di sezioni variabili

Section 0°

Minimum radius: 1.56027 m Maximum radius: 1.69098 m Average radius: 1.60869 m

18

12

15

20

28

13

9 8

7

9

8

7

-22

-16

-8

7 9 7

8

-10

-7

8

95

Section 180°

Minimum radius: 1.54281 m Maximum radius: 1.86809 m Average radius: 1.6467 m



Unità di misura: mm



Figura 107: profilo spessimetrico 1

⊥ x

Section 25°

Minimum radius: 1.5543 m Maximum radius: 1.86203 m Average radius: 1.6137 m

Section 205°

Minimum radius: 1.52896 m Maximum radius: 1.83888 m Average radius: 1.61833 m



Unità di misura: mm

Y.

7

х

Figura 108: profilo spessimetrico 2

Section 50° Section 230° Minimum radius: 1.55357 m Minimum radius: 1.41551 m Maximum radius: 1.8563 m Maximum radius: 1.84868 m 0% Average radius: 1.58037 m Average radius: 1.61879 m +50 +0.0139% +38.1 12 21 26 7 10 22 18 12 -34, 12 8 -50 8 -14 -49 -15 -16 -19 22 -22 -33 -23 -8 -8 +98.9% -15 -7 -15 -18 -7 7 -13 10 -29 -14 -20 -14 -15 -8 -17 17 -14 18 -11 -7 -7 -9 8 -8 7 -38.1 × Z × -8 +1.13% 45 -11 -50 0%

Unità di misura: mm

Non definito



Figura 109: profilo spessimetrico 3



Figura 110: profilo spessimetrico 4

Section 100° Section 280° Minimum radius: 1.54693 m Minimum radius: 1.48466 m Maximum radius: 1.9061 m Maximum radius: 1.6534 m 0% Average radius: 1.60496 m Average radius: 1.59292 m +50 +0.49% +38.1 10 49 -8 50 26 15 28 8 10 -10 -7 -14 20 -22 -13 -32 -20 -16 -17 -21 -16 -16 -28 -48 -26 -10 -36 -18 +98.2 -50 -26 -19 -24 -22 -9 -18 -16 -22 -18 -13 -14 -16 -15 -13 -15 -14 11 -10 -9 -8 -8 -7 -8 -11 -10 -7 -38.1 Z Y x -13 -9 +1.34% 38 -50 0%

Non definito

Unità di misura: mm

z _y_x

Figura 111: profilo spessimetrico 5

Section 125° Section 305° Minimum radius: 1.55657 m Minimum radius: 1.52122 m Maximum radius: 1.91477 m Maximum radius: 1.63123 m 0% Average radius: 1.65539 m Average radius: 1.60346 m +50 +0.217% +38.1 9 36 26 28 26 7 22 14 16 13 , 49 -7 13 -12 -7 -8 -9 -10 -8 -9 -11 -12 -26 -8 -11 -7 30 99.4% 18 -7 -14 -10 -14 8 -19 -7 -7 -7 -43 -争 -8 -11 -17 -10 -7 -10 -9 -50 -7 -11 -10 -10 -7 -38.1 Z Z X 44 44 +0.333% -50 0% Non definito Unità di misura: mm Z

Figura 112: profilo spessimetrico 6

XY

Section 150° Section 330° Minimum radius: 1.55707 m Minimum radius: 1.56519 m Maximum radius: 1.94278 m Maximum radius: 1.6221 m 0% Average radius: 1.58717 m Average radius: 1.59173 m +50 +0.0128% +38.1 19 13 15 14 17 27 21 22 11 17 10 16 8 11 -7 7 -8 -11 7 7 -8 7 +100% 9 1181 7 -9 7 -18 29 16 9 7 9 7 -8 -7 -16 19 -26 -38.1 -7 0% -7 36 -18 Έ -50 0%

Unità di misura: mm

Non definito

Z

XY

Figura 113: profilo spessimetrico 7



Figura 114: profilo spessimetrico 8



Figura 115: scanner 3D virola IV



Tank definition

Elevation marker: X= -0.18797 m ; Y= -0.03091 m ; Z= -0.05985 m Orientation marker: X= -0.07618 m ; Y= -0.02748 m ; Z= 1.54433 m Tank height: 5 m

Best cylinder computation

Number of points: 85918 Distance of worst point: 0.03548 m Standard deviation: 0.01083 m Cylinder axis: X= -0.00239 m ; Y= 0.00042 m ; Z= 1 m Cylinder diameter: 3.0173 m

Plumbness computation

Measured plumbness: 0.0078 m Tolerance: 0.05 m (according to API 653)



Figura 117: scanner 3D virola IV

id	nome	Dev 3D (m)
2	Etichetta #2	0.03051
3	Etichetta #3	-0.02051
4	Etichetta #4	0.02496
5	Etichetta #5	-0.00476



Figura 118: scanner 3D virola IV



Angolo della sezione (°)	Raggio medio (m)	Raggio min. (m)	Raggio max. (m)
0	1.52083	1.51265	1.5238
25	1.52378	1.51878	1.53068
50	1.50916	1.48726	1.52529
75	1.50622	1.50007	1.51906
100	1.50929	1.50289	1.51386
125	1.501	1.49655	1.50747
150	1.50351	1.49613	1.50736
175	1.50203	1.49621	1.50701
180	1.50335	1.49619	1.50934
205	1.51676	1.50736	1.52515
230	1.52095	1.51844	1.5263
255	1.51731	1.51024	1.52505
280	1.51008	1.50054	1.51401
305	1.48789	1.4767	1.49443
330	1.49625	1.49097	1.50935
355	1.51701	1.5114	1.52411

Tabella 22: raggi in funzione di sezioni variabili





Deviation magnification x5.58718

Figura 119: variazione spessori sezione 1

Section 25°

Minimum radius: 1.51878 m Maximum radius: 1.53068 m Average radius: 1.52378 m

Section 205°

Minimum radius: 1.50736 m Maximum radius: 1.52515 m Average radius: 1.51676 m





1:31 ⊢ 0.5 m —



Figura 120: variazione spessori sezione 2

Section 50°

Minimum radius: 1.48726 m Maximum radius: 1.52529 m Average radius: 1.50916 m

Section 230°

Minimum radius: 1.51844 m Maximum radius: 1.5263 m Average radius: 1.52095 m





Deviation magnification x5.58718

Figura 121: variazione spessori sezione 3

Section 75°

Minimum radius: 1.50007 m Maximum radius: 1.51906 m Average radius: 1.50622 m

Section 255°

Minimum radius: 1.51024 m Maximum radius: 1.52505 m Average radius: 1.51731 m





Deviation magnification x5.58718

Figura 122: variazione spessori sezione 4

Section 100°

Minimum radius: 1.50289 m Maximum radius: 1.51386 m Average radius: 1.50929 m

Section 280°

Minimum radius: 1.50054 m Maximum radius: 1.51401 m Average radius: 1.51008 m





Deviation magnification x5.5871

Figura 123: variazione spessori sezione 5

Section 125°

Minimum radius: 1.49655 m Maximum radius: 1.50747 m Average radius: 1.501 m

Section 305°

Minimum radius: 1.4767 m Maximum radius: 1.49443 m Average radius: 1.48789 m





1:32 ⊢ 0.5 m —

Figura 124: variazione spessori sezione 6

Section 150°

Minimum radius: 1.49613 m Maximum radius: 1.50736 m Average radius: 1.50351 m

Section 330°

Minimum radius: 1.49097 m Maximum radius: 1.50935 m Average radius: 1.49625 m





1:32 ⊢ 0.5 m — I

Deviation magnification x5.58718

Figura 125: variazione spessori sezione 7



-0.002

-0.003

-0.004

-0.004

-0.007

-0.011





Figura 126: variazione spessori sezione 8

Altezza sezione (m)	Raggio medio (m)	Raggio min. (m)	Raggio max. (m)	Raggio min. accett. (m)	Raggio max. accett. (m)
0.25	1.5088	1.4903	1.5271	1.49595	1.52135
0.5	1.50958	1.49057	1.53017	1.47055	1.54675
0.75	1.51091	1.48749	1.53444	1.47055	1.54675
1	1.50948	1.49009	1.53525	1.47055	1.54675
1.25	1.5092	1.4897	1.53136	1.47055	1.54675
1.5	1.50908	1.4879	1.52985	1.47055	1.54675
1.75	1.50901	1.48654	1.52743	1.47055	1.54675
2	1.5084	1.48529	1.52629	1.47055	1.54675
2.25	1.50893	1.48486	1.52624	1.47055	1.54675
2.5	1.50659	1.48098	1.5242	1.47055	1.54675
2.75	1.5075	1.48178	1.52256	1.47055	1.54675
3	1.50826	1.48328	1.52471	1.47055	1.54675

Tabella 23: raggi in funzione di sezioni variabili

Section at 0.25 m

Position on cylinder axis: X= -0.07652 m ; Y= -1.54987 m ; Z= 0.18733 m Acceptable radius: [1.49595 m;1.52135 m] Minimum radius: 1.4903 m Maximum radius: 1.5271 m Average radius: 1.5088 m





Deviation magnification x5.55746

Figura 127: variazione circonferenza sezione 0.25 m

Section at 0.5 m

Position on cylinder axis: X= -0.07711 m ; Y= -1.54977 m ; Z= 0.43733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.49057 m Maximum radius: 1.53017 m Average radius: 1.50958 m





Deviation magnification x5.55746

Figura 128: variazione circonferenza sezione 0.50 m

Section at 0.75 m

Position on cylinder axis: X= -0.07771 m ; Y= -1.54966 m ; Z= 0.68733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.48749 m Maximum radius: 1.53444 m Average radius: 1.51091 m





Figura 129: variazione circonferenza sezione 0.75 m

Section at 1 m

Position on cylinder axis: X= -0.07831 m ; Y= -1.54956 m ; Z= 0.93733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.49009 m Maximum radius: 1.53525 m Average radius: 1.50948 m





Figura 130: variazione circonferenza sezione 1.00 m

Section at 1.25 m

Position on cylinder axis: X= -0.0789 m ; Y= -1.54945 m ; Z= 1.18733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.4897 m Maximum radius: 1.53136 m Average radius: 1.5092 m





Deviation magnification x5.55746

Figura 131: variazione circonferenza sezione 1.25 m

Section at 1.5 m

Position on cylinder axis: X= -0.0795 m ; Y= -1.54935 m ; Z= 1.43733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.4879 m Maximum radius: 1.52985 m Average radius: 1.50908 m





1:38 ⊢0.5 m — I

Deviation magnification x5.55746

Section at 1.75 m

Position on cylinder axis: X= -0.0801 m ; Y= -1.54924 m ; Z= 1.68733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.48654 m Maximum radius: 1.52743 m Average radius: 1.50901 m





Deviation magnification x5.55746

Figura 133: variazione circonferenza sezione 1.75 m

Section at 2 m

Position on cylinder axis: X= -0.0807 m ; Y= -1.54914 m ; Z= 1.93733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.48529 m Maximum radius: 1.52629 m Average radius: 1.5084 m





1:38 ⊢ 0.5 m - I

Deviation magnification x5.55746

Figura 134: variazione circonferenza sezione 2.00 m

Section at 2.25 m

Position on cylinder axis: X= -0.08129 m ; Y= -1.54903 m ; Z= 2.18733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.48486 m Maximum radius: 1.52624 m Average radius: 1.50893 m





Deviation magnification x5.55746

Figura 135: variazione circonferenza sezione 2.25 m

Section at 2.5 m

Position on cylinder axis: X= -0.08189 m ; Y= -1.54893 m ; Z= 2.43733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.48098 m Maximum radius: 1.5242 m Average radius: 1.50659 m





Deviation magnification x5.55746

Section at 2.75 m

Position on cylinder axis: X= -0.08249 m ; Y= -1.54882 m ; Z= 2.68733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.48178 m Maximum radius: 1.52256 m Average radius: 1.5075 m





Deviation magnification x5.55746

Figura 137: variazione circonferenza sezione 2.75 m

Section at 3 m

Position on cylinder axis: X= -0.08309 m ; Y= -1.54872 m ; Z= 2.93733 m Acceptable radius: [1.47055 m;1.54675 m] Minimum radius: 1.48328 m Maximum radius: 1.52471 m Average radius: 1.50826 m





Deviation magnification x5.55746

Figura 138: variazione circonferenza sezione 3.00 m

CAPITOLO 7: ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Sulla base di quanto indicato nello standard API 579-11 descritto al paragrafo 6.5.1 è stata effettuata un'analisi FEM per verificare l'integrità strutturale e l'operabilità della colonna alle condizioni di progetto.

Fluido:	Esano	Eff. Sald. Fondi	0,85	Altezza	28500 mm
Press. progetto	3 ate	Eff. Sald. Fasciame	0,85	Diametro	3000 mm
Press. Bolla	3 ate	Proc. Saltadure	Man+Aut.	Spessore	8/10 mm
Press. idrostatica	4,5 ate	Categ. Saldature	2°B	Capacità	198500 L
Temp. Progetto	130 °C			Peso vuoto	30000 kg
Categ. Appar.	2°			Materiale	Fe 42.1

Si riporta di seguito un riassunto delle specifiche di progettazione:

Tabella 24: proprietà geometriche colonna C-206

7.1 Proprietà del materiale

A seguito della deformazione avvenuta nella regione della bugna della IV virola, l'analisi metallurgica ha evidenziato un ingrossamento dei grani. L'alterazione termica del metallo ha determinato una riduzione delle proprietà meccaniche, rendendo necessaria l'applicazione di coefficienti correttivi per adeguare i valori originali.

A tale scopo è stato approfondito l'articolo di ricerca "Post-fire mechanical properties of structural steel" di C. Maraveas e Z. Fasoulakis presentato all'8th National Steel Structures Conference, Tipoli, Greece. Lo studio analizza la degradazione delle proprietà meccaniche dell'acciaio a seguito dell'esposizione all'incendio e del successivo raffreddamento.

In particolare, i risultati mostrano una riduzione di E, Rs e Rm soltanto a temperature superiori a 600°C. Oltre questa soglia, le proprietà meccaniche dell'acciaio decrescono con andamento lineare in funzione della temperatura mediante le seguenti leggi:

$$\frac{f_{yT}}{f_y} = \begin{cases} 1 & T \le 600^{\circ}C \\ 1.504 - T/1200 , \ \frac{f_{uT}}{f_u} = \begin{cases} 1 & T \le 600^{\circ}C \\ 1.208 - T/2900 & 600^{\circ}C < T < 900^{\circ}C \\ 0.896 & T \ge 900^{\circ}C \end{cases}$$

[Equazione 7.1.1]

$$\frac{E_{sT}}{E_s} = \begin{cases} 1 & T \le 600^{\circ}C \\ 1.431 - T/1400 & T > 600^{\circ}C \end{cases}$$
 [Equazione 7.1.2]

Ipotizzando che si siano sviluppate temperature superiori a 800°C durante l'autocombustione interna come riportato al paragrafo 6.4.5, applicando le precedenti formule si ottiene:

$$\frac{f_{yT}}{f_y} = 1.504 - \frac{T}{1200} = 1.504 - \frac{800}{1200} = 0.84$$
 [Equazione 7.1.3]

$$\frac{f_{uT}}{f_u} = 1.208 - \frac{T}{2900} = 1.208 - \frac{800}{2900} = 0.93$$
 [Equazione 7.1.4]

$$\frac{E_{ST}}{E_S} = 1.431 - \frac{T}{1400} = 1.431 - \frac{800}{1400} = 0.86$$
 [Equazione 7.1.5]

т	f _{yT} /f _y	f _{uT} /f _u	E _{sT} /E _s
°C			
800	0.84	0.93	0.86

Tabella 25: fattori correttivi delle proprietà meccaniche

Come si può osservare, la scelta di un abbattimento delle proprietà dell'80% comporta una stima conservativa per la modellazione del metallo nell'analisi FEM.

Il comportamento del materiale sarà considerato elasto-perfettamente plastico con la teoria dei grandi spostamenti al fine di apprezzare eventuali fenomeni del secondo ordine. Duque, a 130°C le proprietà dell'acciaio Fe 42.1 risultano essere:

		Carico	unitar	io di sn	ervamen	to a ca	ldo●* a	
Acciaio	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C
UNI 5869-66		Rs ♦ min. kg/mm°						
Fe 37-1	17	16,5	15	13,5	12,5	11,5	_	
Fe 37-2	17	16,5	15	13,5	12,5	11,5		-
Fe 42-1	20,5	20	19	16	15	14		
Fe 42-2	20,5	19,5	18	16	15	14		_

Tabella 26: proprietà Fe 42.1
Interpolando linearmente a 130°C si ottiene 20,7 kg/mm², che corrisponde a 203 MPa, mentre il modulo di Young ottenuto dalla normativa alla temperatura di esercizio è pari a 193200 MPa e R_m = 420 MPa.

Si procede a moltiplicare le proprietà per i coefficienti precedentemente calcolati:

$R^*_{p0,2/T} = 203 MPa \cdot 0.84 = 170.52 MPa$	[Equazione 7.1.6]
$E^* = 193200 MPa \cdot 0,86 = 166152 MPa$	[Equazione 7.1.7]
$R^*_{m/T} = 420 MPa \cdot 0.93 = 391 MPa$	[Equazione 7.1.8]

Sono state dunque create due tipologie di materiale: uno, con caratteristiche inalterate, per la zona della virola indeformata, e un altro per l'area della bugna.

	A B C D				E				
1	Contents of Engineering Data 🗦 🥥 🐼 Source			:e	Description				
2	Material								
3	📎 Structural Steel Burned 📃 🗐 👺 G: V 🖥			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1					
4	🗞 Structural Steel Unburned 🗾 🕅 🛱 G:V			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1					
*	Click here to add a new material								
Properti	es of Outline Row 4: Structural Steel Unburned							-	φ×
	A					В	С	D	Е
1	Property					Value	Unit	8) (p.)
2	🚰 Material Field Variables					III Table			
3	🔁 Density					7,85E-09	tonne mm^-3	-	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion								
6	😑 🔀 Isotropic Elasticity								í 🔄
7	Derive from				Young's Modulus and Poisson				
8	Young's Modulus					1,932E+05	MPa	-	
9	Poisson's Ratio					0,3			
10	Bulk Modulus					1,61E+05	MPa		
11	Shear Modulus					74308	MPa		
12	Bilinear Isotropic Hardening								<u>i</u>
16	🗉 🔁 Strain-Life Parameters								i
24	🗄 🕑 🔁 S-N Curve					III Tabular			1
28	B Tensile Yield Strength					203	MPa	-	
29	Compressive Yield Strength					203	MPa	-	
30	🔁 Tensile Ultimate Strength					420	MPa	-	
31	1 Compressive Ultimate Strength					0	MPa	-	

Tabella 27: proprietà unburned steel

	А	A B C D E		E					
1	Contents of Engineering Data	9	8	Sour	rce		Description		
2	Material								
3	🗞 Structural Steel Burned		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1						
4	📎 Structural Steel Unburned 🔽 🖂 👺 G:V			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1					
*	Click here to add a new material								
Properti	es of Outline Row 3: Structural Steel Burned							- I	ιx
	A					В	С	D	Е
1	Property					Value	Unit	8	φJ
2	🔁 Material Field Variables				III Table				
3	🔁 Density				7,85E-09	tonne mm^-3			
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion								
6	😑 📔 Isotropic Elasticity								
7	Derive from					Young's Modulus and Poisson			
8	Young's Modulus					1,6615E+05	MPa		
9	Poisson's Ratio					0,3			
10	Bulk Modulus					1,3846E+05	MPa		
11	Shear Modulus					63905	MPa		
12	🗷 📔 Bilinear Isotropic Hardening								
16	🗷 🔀 Strain-Life Parameters								
24	🗷 🚰 S-N Curve				Tabular				
28	🔁 Tensile Yield Strength				170,52	MPa			
29	Compressive Yield Strength					170,52	MPa		
30	🔁 Tensile Ultimate Strength					391	MPa		
31	Compressive Ultimate Strength				0	MPa			

Tabella 28: proprietà burned steel

7.2 Modello tridimensionale

In un primo momento, è stata modellata l'intera colonna, completa di tutti i bocchelli e della gonna di supporto. Tuttavia, nell'analisi agli elementi finiti, la geometria del materiale influisce significativamente sui risultati: è fondamentale semplificare le aree non coinvolte nel fenomeno studiato, concentrando il dettaglio solo nelle regioni di interesse. Questo perché il calcolo sull'intera struttura comporterebbe tempi computazionali eccessivi, fornendo risultati non pertinenti agli obiettivi della tesi.

A scopo descrittivo, si riporta comunque il modello dove è possibile vedere l'altezza e l'orientamento dei relativi bocchelli.



Figura 139: modello tridimensionale della colonna C-206



Figura 140: vista 1 colonna C-206

Figura 141: vista 2 colonna C-206



Figura 142: vista 3 colonna C-206

Figura 143: vista 4 colonna C-206

Il modello precedente, realizzato unicamente per un confronto grafico con il disegno tecnico e le foto di ispezione, non include la quarta virola deformata.

Un approccio più semplice e rapido consiste invece nel modellare la colonna con delle superfici, assegnando lo spessore direttamente nella fase di calcolo computazionale. Questo metodo permette al software di generare un modello grafico più leggero, pur mantenendo la rappresentazione volumetrica necessaria per l'analisi meccanica.

Le scannerizzazioni tridimensionali presenti al paragrafo 6.8 forniscono la variazione della sezione circolare della colonna. Per la realizzazione della IV virola, sono stati utilizzati questi risultati ed è stato possibile costruire 10 circonferenze a diametro variabile con distanza di 0,25 m lungo l'asse z. Successivamente, è stata generata una superficie esterna di interpolazione tra le circonferenze ad altezza variabile capace di rappresentare una geometria quanto più possibile vicino alla realtà.



Ad esempio, si prenda in considerazione la seguente sezione deformata:

La figura di destra mostra l'interpolazione di ogni raggio che è stato disegnato con le relative misure deformate. Nella figura di sinistra, nel primo quadrante, è possibile osservare un raggio pari a 1500 m - 0.024 m, - 0,027 m, - 0,026 m e così via. Tracciando quindi le linee di costruzione con il raggio minorato o maggiorato della misura ottenuta dalla scannerizzazione tridimensionale, è stata disegnata, attraverso l'utilizzo di una polilinea di interpolazione, una sezione deformata.

Tale procedura è stata effettuata per ogni sezione disponibile, che vede un'estensione da 0,25 m fino a 3 m di altezza. Ciò significa che, essendo ogni virola alta 2,5 m le misure ottenute proseguono per ulteriori 0,5 m rispetto all'estensione della quarta virola. In questo modo è stato possibile effettuare una valutazione della deformazione che si prolunga oltre la geometria di interesse al fine di valutare gli effetti subiti nelle zone limitrofe.

Il modello ottenuto dimostra che le deformazioni non interessano solamente la zona soggetta ad alterazione termica ma, con più o meno estensione, è possibile osservare vari imbozzamenti distribuiti lungo la superficie.



Figura 146: raggi e circonferenze interpolate

Figura 147: bugna evidenziata nella zona deformata

La figura sinistra mostra dunque il risultato di tutte le sezioni ottenute, mentre la figura di destra mostra soltanto le circonferenze deformate ricavate dalle interpolazioni di polilinee. Il software ANSYS consente dunque di poter creare delle superfici a partire da sezioni che si estendono nella dimensione spaziale.



Figura 148: superficie bidimensionale della IV° virola

Figura 149: bugna reale della IV virola

Al fine di estendere la deformazione in fase di esercizio durante la simulazione, sono state disegnati anche 0,5 m di sezione della III e della V virola, ed è stata rappresentata una superficie delimitata che evidenziasse la bugna.





Figura 150: superficie esterna vista 1

Figura 151: superficie esterna vista 2

La zona evidenziata ha voluto prendere in considerazione sia la bugna, che ha una freccia verso l'interno, sia il rigonfiamento maggiore, visibile al lato destro della deformazione delimitata dall'area rosa.

Questo modello ha consentito di rappresentare, seppur in modo approssimativo, la deformata reale.





Figura 153: bugna della IV virola reale

Figura 152: bugna della IV virola con estensione di 0,5 m della III e V virola

L'analisi FEM prevede quindi la discretizzazione delle superfici che consiste nella suddivisione di una geometria continua in un numero finito di elementi più semplici, fornendo una mesh che influisce direttamente sull'analisi delle tensioni.

7.3 Mesh

La discretizzazione delle superfici avviene attraverso la generazione di una mesh, che consiste in una rete di nodi ed elementi. Questi elementi possono assumere diverse forme geometriche: nei domini bidimensionali sono spesso triangolari, quadrangolari o più complessi, mentre in quelli tridimensionali possono essere tetraedri, esaedri e altre configurazioni avanzate.

L'elemento triangolare fornisce un duplice effetto: i suoi bordi sono dritti e restano tali anche dopo l'applicazione della sollecitazione che ne promuove la deformazione e si produce una distribuzione delle forze uniformi. Le prime problematiche compaiono però nel caso di geometrie curve che possono provocare notevoli differenze di distribuzioni delle deformazioni.

Grazie a funzioni di interpolazione di ordine più elevato, è consigliato utilizzare elementi quadrangolari che sono in grado di modellare meglio bordi curvi e di fornire migliori distribuzioni di deformazione.

In questo caso, al fine di produrre un modello tridimensionale leggero che fornisca comunque ottimi risultati con bassi tempi di calcolo, è stato scelto di utilizzare elementi quadrangolari di 75 mm per la virola e 25 mm per la bugna. Gli elementi che congiungono le due aree sono stati rappresentati automaticamente dal software con geometrie di dimensioni variabili per avere una continuità nodale.



Figura 154: mesh globale con elementi quadrangolari



Figura 155: dettaglio mesh della zona deformata

La qualità della mesh è piuttosto elevata, con il 99% degli elementi che ricadono nel range 0,75 – 1,00 corrispondenti al massimo livello qualitativo, come indicato nel seguente grafico.



Grafico 2: qualità degli elementi della mesh

7.4 Analisi dei carichi e dei vincoli

Al fine di modellare correttamente la colonna in esercizio, è necessario aggiungere le condizioni al contorno di forze, vincoli e spostamenti. In particolare, è necessario introdurre:

- Peso della struttura;
- Pressure thrust;
- Pressione;
- Remote displacement;

7.4.1 Peso della struttura

Il peso della colonna vuota risulta essere 30.000 kg. Tuttavia, questo dato fa riferimento alla sola parte delle lamiere metalliche nella loro totalità.

Si può stimare il peso che si esercita sopra la V virola, sezionata a 0,5 m di distanza dalla IV virola come frazione percentuale del peso totale in funzione dell'altezza della colonna. Se dal fondo inferiore al fondo superiore si ha un'altezza totale di 28720 mm, ed essendo la parte considerata della V virola situata ad un'altezza di 11260 mm, in modo approssimativo, è possibile dedurre che:

Peso Totale : Altezza Totale = Peso Parziale : Altezza Parziale

$$30000: 28720 = Peso \ parziale: 11260 \rightarrow P_{parz} = \frac{30000 \cdot 11260}{28720} = 11762 \ \text{kg}$$

[Equazione 7.4.1.1]

È necessario considerare poi anche la presenza del pall rings nelle altezze di riempimento, i quali hanno dimensione 50 mm x 50 mm e uno spessore di 1 mm.

Secondo quanto fornito dal venditore, ogni m³ di riempimento può contenere fino a 6000 unità, per un peso totale di:

$$\rho_{riempimento} = \frac{Peso_{pall rings}}{m^3 \, di \, riempimento} = 354 \, \frac{kg \, di \, riempimento}{m^3 \, di \, riempimento}$$
[Equazione 7.4.1.2]

PERFORMANCE CONS	IDERATI	ЛС			
Packing Size mm	16	25	38	50	90
Free Space %	93	94	95	96	97
Specific Surface Area (m2/m3)	316	209	122	100	54
No. Per Unit Volume (m3)	210,000	49,500	13,450	6,000	1,000
SPECIFIC WEIGHT KG	/M3				
Specific Weight (kg/m3) Stainless Steel	16	25	38	50	90
0.3	400	N/A	N/A	N/A	N/A
0.4	535	322	200	N/A	N/A
0.5	N/A	403	250	196	N/A
0.6	N/A	483	300	235	N/A
0.7	N/A	564	350	275	144
0.8	N/A	644	400	314	165
0.9	N/A	N/A	N/A	354	180
1.0	N/A	N/A	N/A	N/A	206

Tabella 29: proprietà dei corpi di riempimento

La colonna presenta, in particolar modo, tre letti di riempimento, due dei quali alti 6200 mm e uno 4200 mm con diametro interno di 3000 mm. Dal general arrangement si evince quindi il volume di riempimento:

$$V_{riempimento} = \frac{\pi \cdot d_{int}^{2}}{4} \cdot h_{riempimento} \cdot N_{riempimenti} = \frac{\pi \cdot 3^{2}}{4} \cdot 6,20 \cdot 2 + \frac{\pi \cdot 3^{2}}{4} \cdot 4,20 \cdot 1 =$$
117,4 m³ [Equazione 7.4.1.3]

Ciò significa che il volume totale del riempimento pesa:

$$Peso_{riempimento} = \frac{kg \ di \ riempimento}{m^3 \ di \ riempimento} \cdot V_{riempimento} = 354 \cdot 117,4 = 41560 \ kg$$
[Equazione 7.4.1.4]

A questi risultati si dovrebbe addizionare ulteriori pesi dovuti alla presenza dei ridistributori del liquido, delle griglie di supporto, delle travi di sostegno e, in generale, di tutti i componenti interni.

Dal disegno geometrico fornito dal costruttore, si osserva la presenza di 6 griglie di supporto, più una superiore, che hanno uno spessore di 10 mm. Calcolando il volume e moltiplicandolo per la densità si ottiene:

$$Peso_{griglia} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot s \cdot \rho \cdot N_{griglie} = \frac{\pi \cdot 3^2}{4} \cdot 0,01 \cdot 7850 \cdot 7 = 3884 \ kg$$
[Equazione 7.4.1.5]

Non essendo al corrente delle caratteristiche geometriche delle restanti parti interne, si ipotizza una maggiorazione del 10% del peso parziale della colonna.

 $Pes_{totale} = (Peso_{parziale} \cdot 1, 1 + Peso_{riempimento}) = 11762 \cdot 1, 1 + 41560 = 54500 kg$ [Equazione 7.4.1.6]

Si converte quindi il peso in forza: $F_g = 54500 \cdot 9,81 = 534645 N$



D	Details of "Weight" 🔹 🔻 🗖 🗙			
-	Scope			
	Scoping Method	Geometry Selection		
	Geometry	1 Edge		
Ξ	Definition			
	Туре	Force		
	Define By	Components		
	Applied By	Surface Effect		
	Coordinate System	Global Coordinate System		
	X Component	0, N (ramped)		
	Y Component	0, N (ramped)		
	Z Component	-5,3464e+005 N (ramped)		
	Suppressed	No		

Tabella 30: proprietà weight force

7.4.2 Pressure thrust

Si tratta della forza risultante generata dalla pressione applicata su una superficie in un sistema meccanico. È quindi l'effetto netto di una pressione uniforme che influenza lo stato di sforzo e deformazione della struttura. Si può calcolare moltiplicando la pressione in MPa per l'area in m² e considerando una sezione interna deformata avente un diametro medio di 3,017 mm nella zona di interesse.

: Static Structural	Details of "Pressure	Thrust" 🚥 🗸 🗖 🗖	
ressure Thrust ime: 1, s	- Scope		
5/03/2025 12:02:27	Scoping Method	Geometry Selection	
Pressure Thrust: 2,1e+006 N	Geometry	1 Edge	
Components: 0,;0,;2,1e+006 N	Coordinate Syste	m Global Coordinate System	
Locadon. 3,10340 003, 7,43300 003, 3, III	X Coordinate	5,1034e-003 m	
	Y Coordinate	-7,4396e-003 m	
	Z Coordinate	3, m	
	Location	Click to Change	
	Definition	Definition	
	Туре	Remote Force	
	Define By	Components	
	X Component	0, N (ramped)	
	Y Component	0, N (ramped)	
7	Z Component	2,1e+006 N (ramped)	
	Suppressed	No	
	Behavior	Deformable	
	+ Advanced		

Figura 156: pressure thrust

7.4.3 Pressione

Nella definizione dei carichi, è stata applicata una pressione relativa di progetto pari a 3 ate, ossia 2,94 barg distribuendola uniformemente sulle superfici interne delle virole. Questo valore, che è più alto rispetto alla pressione operativa, è stato introdotto in modo conservativo.

Trattandosi di una pressione relativa, non è necessario introdurre nel modello la pressione atmosferica esterna.



D	Details of "Pressure" 💌 🔻 🗖 🗖 🗙					
-	Scope					
	Scoping Method	Geometry Selection				
	Geometry	4 Faces				
-	Definition					
	Туре	Pressure				
	Define By	Normal To				
	Applied By	Surface Effect				
	Loaded Area	Deformed				
	Magnitude	2,94e+005 Pa (ramped)				
	Suppressed	No				

Tabella 32: proprietà pressione

7.4.4 Remote displacement

Il software ansys fornisce diversi strumenti per la definizione dei vincoli e dei gradi di libertà. In particolar modo, i remote displacement sono utilizzati per applicazioni in punti specifici del modello, consentendo, ad esempio, di ancorare un oggetto al piano inferiore e di lasciarlo libero di deformarsi superiormente.



D	Details of "Remote Displacement" 👐 🖛 🖛 🗙					
=	Scope					
	Scoping Method	Geometry Selection				
	Geometry	1 Edge				
	Coordinate System	Global Coordinate System				
	X Coordinate	0, m				
	Y Coordinate	0, m				
	Z Coordinate	-0,5 m				
	Location	Click to Change				
Ξ	Definition					
	Туре	Remote Displacement				
	X Component	0, m (ramped)				
	Y Component	0, m (ramped)				
	Z Component	0, m (ramped)				
	Rotation X	Free				
	Rotation Y	Free				
	Rotation Z	0, ° (ramped)				
	Suppressed	No				
	Behavior	Deformable				
+	Advanced					

Tabella 33: proprietà remote displacement

Figura 158: remote displacement

Nel caso in esame, è stato applicato un vincolo alla base della sezione a 0,5m della III virola, essendo questa saldata alla IV e, di conseguenza, alla V. Prendendo come riferimento il sistema di coordinate globali, è stato imposto uno spostamento di (X, Y, Z) = (0, 0, 0), lasciando invece libera la rotazione negli assi X, Y e bloccandola lungo Z, con comportamento deformabile.

La sezione superiore è indirettamente vincolata dalle forze di pressione, di pressure thrust e di peso in quanto esse consentono di stabilire una continuità con gli elementi soprastanti la colonna.

7.5 Analisi dei risultati e post process

Definiti quindi i materiali, i vincoli e le condizioni al contorno, il software restituisce un risultato che, nel gergo tecnico, è chiamato post process. Nel nostro caso in esame, è stato scelto di considerare:

- Spostamenti (displacement);
- Tensioni (stress);
- Deformazioni (strain);

7.5.1 Spostamenti

Si riporta, di seguito, gli spostamenti ottenuti dalla deformazione con un fattore di amplificazione pari a 5,4.



Figura 159: global deformation

Prendendo l'asse x come spostamento radiale in coordinate cartesiane, si osserva una deformata massima verso l'esterno di circa 6 mm e verso l'interno di circa 2,5 mm.

Questi risultati rientrano nel campo dei piccoli spostamenti tollerabili dalla struttura e dalla deformazione termomeccanica del materiale.

7.5.2 Tensioni

Nell'ambito dell'analisi strutturale, la tensione di von Mises è uno dei parametri più importanti per valutare il comportamento meccanico di un materiale sottoposto a carichi. Questo valore permette di sintetizzare in un unico risultato l'effetto combinato delle diverse componenti di tensione, normali e tangenziali, che agiscono in una determinata zona della struttura.

È quindi possibile confrontare la tensione di snervamento con la tensione di von Mises ottenuta e verificare se la virola subisce deformazioni plastiche.



Figura 160: global equivalent (von-Mises) stress

La distribuzione della tensione lungo lo shell riporta un andamento medio tra 10 – 80 MPa, con alcuni valori critici nelle zone della bugna colorate di verde-arancione.

Si analizza quindi il dettaglio della deformazione:



Figura 161: global equivalent (von-Mises) stress

I valori nella regione della bugna raggiungono un massimo di circa 157 MPa nelle aree arancioni.

Si ricorda che il materiale della superficie deformata è stato modellato con proprietà meccaniche più basse, in quanto i valori iniziali sono stati moltiplicati per dei coefficienti riduttivi che hanno tenuto in considerazione l'innalzamento di temperatura localizzato provocato dal possibile incendio.

La tabella 28 a p. 145 riporta un valore di $R_{p0,2/T}$ pari a 170 MPa, il che significa che la tensione equivalente nella zona deformata è al di sotto dello snervamento.

Tuttavia, vi è da specificare che la tensione di von Mises è un valore medio calcolato su un elemento della mesh. In presenza di variazioni geometriche, come nel caso della bugna, le tensioni locali possono essere significativamente più elevate rispetto al valore medio. Quindi, per quanto concerne lo snervamento, anche se la tensione di von Mises media è inferiore a $R_{p0,2/T}$, il singolo valore locale può essere più alto.

Il software ansys consente di riportare l'andamento della componente massima della tensione, il che aiuta a comprendere se localmente possano essere avvenute plasticizzazioni:



Figura 162: maximum principal stress

Come si può osservare, alcuni nodi presentano una tensione di circa 180 MPa, superando il valore di snervamento di 170 MPa.

In conclusione, dal punto di vista della tensione di von Mises il campo equivalente calcolato si mantiene al di sotto dello snervamento, mentre secondo il criterio del Rankine la massima componente principale di tensione supera di poco lo snervamento, provocando una plasticizzazione localizzata.

7.5.3 Deformazioni

La deformazione plastica è una misura della deformazione permanente subita dal materiale dopo aver superato il limite di snervamento.



Figura 163: global equivalent (von-Mises) stress



Figura 164: global equivalent (von-Mises) stress

La distribuzione dei colori mostra come la deformazione plastica varia lungo il cilindro. In particolare, le aree in blu indicano una deformazione plastica assente, mentre quelle in rosso rappresentano le zone critiche.

Si osserva che la plasticizzazione è concentrata nell'area della bugna proprio dove la tensione locale, come visibile nella figura 162, ha superato il limite di snervamento, confermando che in questa zona il materiale ha subito una deformazione permanente.

CAPITOLO 8: ANALISI DELLA VITA RESIDUA

La valutazione della vita residua di un'apparecchiatura è di fondamentale importanza per determinare, in base allo spessore disponibile, quanto tempo il sistema può lavorare in esercizio. Come è stato possibile osservare dalle ispezioni esterne e dalle prove spessimetriche, le superfici della colonna si presentano corrose.

Al fine di determinare la vita residua, si procede al calcolo del rateo di corrosione sulla base di quanto indicato dallo standard API 581 – 16 il quale, per il caso in esame di "Corrosion Under Insulation" fornisce al paragrafo 2 il seguente percorso:



Figura 166: determinazione del rateo di corrosione per il caso CUI

Quindi, il tasso di corrosione è calcolato nel seguente modo:

 $C_r = C_{rB} \cdot F_{INS} \cdot F_{CM} \cdot F_{IC} \cdot \max[F_{EQ}, F_{IF}]$

[Equazione 8.1]

Dove:

- C_r: corrosion rate;
- C_{rB}: base corrosion rate;
- F_{INS}: corrosion rate per tipologia di coibente;
- F_{CM}: corrosion rate per complessità del coibente;
- F_{IC}: corrosion rate per condizioni del coibente;
- F_{EQ}: fattore di aggiustamento;
- F_{IF}: fattore di correzione per interfaccia terreno-acqua.

La tabella 16.2M dello standard in questione fornisce il rateo di corrosione base in funzione della temperatura di esercizio e dell'aggressività dell'ambiente:

Operating	Co	Corrosion Rate as a Function of Driver ¹ (mm/y)						
Temperature (°C)	Severe	Moderate	Mild	Dry				
-12	0	0	0	0				
-8	0.076	0.025	0	0				
6	0.254	0.127	0.076	0.025				
32	0.254	0.127	0.076	0.025				
71	0.508	0.254	0.127	0.051				
107	0.254	0.127	0.025	0.025				
135	0.254	0.051	0.025	0				
162	0.127	0.025	0	0				
176	0	0	0	0				

NOTE 1 Driver is defined as the CUI condition causing the corrosion rate. See Part 2, Section 15.6.2 for explanation of drivers.

NOTE 2 Interpolation may be used for intermediate values of temperature.

NOTE 3 A time-weighted average corrosion rate may be used for systems that are in intermittent service or that operate at 2 or more temperatures.

Tabella 34: proprietà corrosion rate

L'alimentazione di kerosene all'impianto avviene ad una temperatura di circa 80°C. Interpolando la precedente tabella si ottiene:

$$C_{rB} = 0.254 + \frac{0.127 - 0.254}{107 - 71} \cdot (80 - 71) = 0.222 \ mm/y$$
 [Equazione 8.2]

Il fattore di aggiustamento, che dipende dal tipo di coibente, può essere dedotto dalla presente tabella:

Insulation Type	Adjustment Factor, <i>F</i> _{INS}
Unknown/unspecified	1.25
Foamglass	0.75
Pearlite	1.0
Fiberglass	1.25
Mineral wool	1.25
Calcium silicate	1.25
Asbestos	1.25

Tabella 35: fattore di aggiustamento del coibente

Secondo quanto indicato dal venditore nella documentazione originale, il materiale del coibente risulta essere fibra di vetro. Quindi: $F_{INS} = 1,25$.

Gli altri coefficienti sono invece assunti pari ad 1, in quanto il coibente si presenta in un buono stato di conservazione. Pertanto, il rateo di corrosione totale risulta pari a:

$$C_r = C_{rB} \cdot F_{INS} = 0,222 \cdot 1,25 = 0,2775 \ mm/y$$
 [Equazione 8.3]

Ipotizzando quindi che la virola possa subire ulteriore perdita di spessore pari a 3 mm, il calcolo della vita residua è ottenuto nel seguente modo:

$$R_{life} = \frac{FCA_{ml}}{C_r} = \frac{3}{0,2775} = 10,8 y$$
 [Equazione 8.4]

Dove:

- R_{life}: vita residua;
- FCAml: spessore da corrosione nell'area interessata dai danneggiamenti.

CAPITOLO 9: CONCLUSIONI E OSSERVAZIONI

La colonna C-206 presenta superfici interne ed esterne corrose. Le analisi spessimetriche, tuttavia, hanno evidenziato uno spessore residuo sufficiente a garantire l'integrità strutturale dell'apparecchiatura.

Durante l'ispezione, è stata osservata una deformazione localizzata, probabilmente dovuta alla formazione di un incendio durante la fase di lavaggio della colonna. Poiché non si è a conoscenza della procedura specifica, l'analisi metallurgica, che evidenzia un ingrossamento localizzato dei grani cristallini, suggerisce che la causa più probabile della deformazione sia da attribuire alla reazione esotermica verificatasi tra i residui di solfuro di ferro e l'ossigeno.

Sulla base di questa ipotesi, l'analisi FEM ha raggiunto la convergenza, producendo così risultati attendibili. In particolare, gli spostamenti positivi e negativi osservati nella zona geometricamente alterata sono, in media, pari a 4 mm, un valore che, su un diametro di 3000 mm, risulta essere tollerabile.

La tensione massima principale ha evidenziato il superamento del valore di snervamento, indicando che nella zona in questione si è verificata una deformazione plastica. Tuttavia, il valore ottenuto di 4,4E-04 consente di affermare che questa plasticizzazione sia di entità molto limitata e dovuta all'azione di tensioni che hanno agito su una superficie limitata, senza compromettere l'integrità della struttura.

Considerando infine una perdita aggiuntiva di 3 mm di spessore, si stima una vita residua di circa 10 anni. Vista la condizione generale della colonna C-206, si consiglia di effettuare un monitoraggio a distanza di due anni con periodiche ispezioni e prove spessimetriche per confermare il tasso di corrosione e garantire la sicurezza dell'apparecchiatura in esercizio.

BIBLIOGRAFIA

Articoli di ricerca

- C. Maraveas, Z. Fasoulakis, *Post-fire mechanical properties of structural steel, National Steel Structures Conference*, Tipoli, Greece;
- Cai-Ping Wang, Zu-Jin Bai, Yang Xiao, Jun Deng, Chi-Min Shu, Effects of FeS2on the process of coal spontaneous combustion at low temperatures, Process Safety and Environmental Protection 142 (2020) 165-173, 11 June 2020;
- Cai Xin, Zhao Xue, Yao Hongqui, Spontaneous combustion tendency of iron sulphide corrosion: oxidation characterization and thermostability, Procedia Engineering 84 (2014) 356-362, 2014 International Symposium on Safety Science and Technology, School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, China;
- Liane G. Benning, Rick T. Wilkin, H.L. Barnes, *Reaction pathways in the Fe-S system below 100°C*, Chemical Geology 167 (2000) 25-51, 13 April 1999;
- Qingda Li, Guomin Hua, Hao Lu, Bin Yu, D.Y. Li, Understanding the Effect of Plastic Deformation on Elastic Modulus of Metals Based on a Percolation Model with Electron Work Function, The Minerals, Metals & Material Society, Vol. 70, No. 7, 2018.
- Semih Genculu, P.E., *Correlation of Hardness Values to Tensile Strength*, CAB Worldwide;

Normative

- API 571: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry;
- API 579: Fitness for Service;
- API 581: Risk-Based Inspection Methodology;
- API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage;
- API 653: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction;
- ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products;
- ASTM D86: Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure;
- ASTM E112: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size;
- ASTM E140: Standard Hardness Conversion Tables for Metals, Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness;
- BS EN ISO 2624:1995:Copper and copper alloys Estimation of average grain size;
- BS EN 62740:2015: Root Cause Analysis;
- EN 13445-3: Recipienti in pressione non soggetti a fiamma;
- EN 5869:1965: Proprietà meccaniche Fe 42.1.

Documentazione Cliente

- Analisi di ispezione colonna C-206;
- Analisi spessimetriche C-206;
- Analisi metallurgiche IV virola colonna C-206;
- Disegno di assieme Colonna C-206;
- Manuale Operativo dell'impianto;
- PFD, P&ID Colonne C-284, C-224, C-206;
- Scanner 3D colonna C-206;