



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

# Rapporto Tecnico Relativo a Studi di Fattibilità e Prove di Fabbricabilità di Elementi Prototipali per Griglie Spaziatrici del Fuel Assembly DEMO ALFRED

*E. Ghisolfi*



Report RdS/PAR2013/036

## Rapporto Tecnico Relativo a Studi di Fattibilità e Prove di Fabbricabilità di Elementi Prototipali per Griglie Spaziatrici del Fuel Assembly DEMO ALFRED

E. Ghisolfi - Fabbricazioni Nucleari

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Mariano Tarantino

Responsabile scientifico F.N.: Enrica Ghisolfi

**Titolo**

Rapporto tecnico relativo a studi di fattibilità e prove di fabbricabilità di elementi prototipali per griglie spaziatrici del fuel assembly DEMO ALFRED

Ente emittente FN S.p.A.

# PAGINA DI GUARDIA

**Descrittori**

**Tipologia del documento:** Rapporto Tecnico  
**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione  
**Argomenti trattati:** Reattori nucleari veloci  
 Generation IV reactors  
 Tecnologia dei reattori nucleari

**Sommario**

Nel presente rapporto, redatto nell'ambito dell'Accordo di collaborazione ENEA – FN ("Prove di fabbricabilità per lo sviluppo griglia per elemento di combustibile LFR"), sono descritte le attività svolte da FN, in continuità alla precedente annualità, relative alla progettazione di una nuova configurazione di griglia da impiegare per l'elemento di combustibile LFR. Partendo dalla valutazione di alcuni parametri critici individuati nella precedente annualità, si è proceduto alla revisione critica della griglia, giungendo alla realizzazione della progettazione esecutiva. In parallelo sono stati valutati i limiti tecnologici delle tecniche di lavorazione prese in considerazione. In particolare ci si è soffermati sulle problematiche relative alla piegatura di acciai inox austenitici anche incruditi, sono state approfondite le caratteristiche dei processi presi in considerazione (foto tranciatura chimica, piegatura, stampaggio), anche mediante analisi sperimentali. Sono stati definiti i cicli di lavoro e le tipologie di stampi necessari, in funzione delle diverse geometrie delle componenti della griglia. Accanto alle attività legate alla parte prototipale, si è iniziata una valutazione di possibili ditte in grado di sostenere la produzione in serie delle griglie secondo le tecniche individuate; tali ditte sono state selezionate anche in base a criteri di garanzia di qualità, assolutamente necessari visto il campo di applicazione.

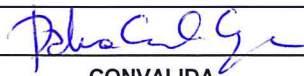

**Note**

Rapporto emesso da FN S.p.A.

**Autori:**

E. Ghisolfi (FN S.p.A.)

**Copia n.**
**In carico a:**

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	26/09/2014	NOME	Patrizio Console Camprini	NA	Mariano Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE



# Rapporto tecnico relativo a studi di fattibilità e prove di fabbricabilità di elementi prototipali per griglie spaziatrici del fuel assembly DEMO ALFRED

Enrica Ghisolfi



Report RdS/PAR2013/036

RAPPORTO TECNICO RELATIVO A STUDI DI FATTIBILITÀ E PROVE DI FABBRICABILITÀ DI ELEMENTI  
PROTOTIPALI PER GRIGLIE SPAZIATRICI DEL FUEL ASSEMBLY DEMO ALFRED

Enrica Ghisolfi (FN SpA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione energia elettrica e protezione ambiente

Progetto: B3.1 "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazioni ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione"

Obiettivo: B - Materiali e fabbricazioni

Responsabile del Progetto: Ing. Mariano Tarantino ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Prove di fabbricabilità per lo sviluppo griglia per elementi di combustibile LFR"*

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Mariano Tarantino

Responsabile scientifico FN SpA: Dr.ssa Enrica Ghisolfi

Si ringraziano il Sig. Carlo Repetto e l'Ing. Emir Poskovic per la preziosa collaborazione e l'Ing. Mariano Tarantino per i suggerimenti sempre puntuali ed opportuni

## Indice

SOMMARIO.....	3
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 REVISIONE CRITICA DELLA CONFIGURAZIONE DI GRIGLIA .....	6
2.2 VERIFICA DELL'IMPATTO DELLE CARATTERISTICHE DEI MATERIALI RISPETTO ALLA LAVORAZIONE DI PIEGATURA CON PARTICOLARE RIGUARDO ALLA DIREZIONE DELLE FIBRE .....	10
2.3 FOTO-TRANCIATURA CHIMICA E TECNICHE TRADIZIONALI A CONFRONTO .....	18
2.4 INDIVIDUAZIONE DEL MATERIALE PER LA REALIZZAZIONE DEI PROTOTIPI .....	26
2.5 PROGETTAZIONE ESECUTIVA DEL NUOVO PROTOTIPO DI GRIGLIA .....	28
2.6 VALUTAZIONI SUI CICLI DI LAVORO E SULLE ATTREZZATURE NECESSARIE .....	29
2.7 VALUTAZIONI CIRCA LA TRASFERIBILITÀ SU SCALA INDUSTRIALE .....	30
3 CONCLUSIONI .....	31
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	32

### APPENDICE: Curriculum gruppo di lavoro

#### ALLEGATI

- Disegno n. J-50 -0158 – part. 1
- Disegno n. J-50 -0159 – part. 2
- Disegno n. J-50 -0160 – part. 3
- Disegno n. J-50 -0161 – part. 4
- Disegno n. J-50 -0162 – part. 5
- Disegno n. J-50 -0163 – part. 6
- Disegno n. J-50 -0165 – part. 8
- Disegno n. J-50 -0166 – part. 9
- Disegno n. J-50 -0167 – part. 10
- Disegno n. J-50 -0168 – part. 11
- Disegno n. J-50 -0169– part. 12
- Disegno n. J-50 -0170 – part. 13
- Disegno n. J-50 -0171 – part. 14



## Sommario

Nel presente rapporto, redatto nell'ambito dell'Accordo di collaborazione ENEA – FN (“Prove di fabbricabilità per lo sviluppo griglia per elemento di combustibile LFR”), sono descritte le attività svolte da FN, in continuità alla precedente annualità, relative alla progettazione di una nuova configurazione di griglia da impiegare per l'elemento di combustibile LFR.

Partendo dalla valutazione di alcuni parametri critici individuati nella precedente annualità, si è proceduto alla revisione critica della griglia, giungendo alla realizzazione della progettazione esecutiva.

In parallelo sono stati valutati i limiti tecnologici delle tecniche di lavorazione prese in considerazione. In particolare ci si è soffermati sulle problematiche relative alla piegatura di acciai inox austenitici anche incruditi, sono state approfondite le caratteristiche dei processi presi in considerazione (foto tranciatura chimica, piegatura, stampaggio), anche mediante analisi sperimentali.

Sono stati definiti i cicli di lavoro e le tipologie di stampi necessari, in funzione delle diverse geometrie delle componenti della griglia.

Accanto alle attività legate alla parte prototipale, si è iniziata una valutazione di possibili ditte in grado di sostenere la produzione in serie delle griglie secondo le tecniche individuate; tali ditte sono state selezionate anche in base a criteri di garanzia di qualità, assolutamente necessari visto il campo di applicazione.

Alcune attività di carattere più sperimentale potranno avere prosecuzione nella prossima annualità.

## 1 Introduzione

Il presente rapporto descrive quanto svolto da FN nell'ambito dell'Accordo di collaborazione con ENEA per un'attività dal titolo: "Prove di fabbricabilità per lo sviluppo griglia per elementi di combustibile LFR". Tale Accordo rientra nell'Accordo di Programma MSE-ENEA – Piano Annuale di Realizzazione 2013 ed è relativo alla tematica di ricerca "Energia Nucleare"; si riferisce alla linea progettuale LP2 "Collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione" obiettivo B – "Materiali e fabbricazioni" del progetto B3.1 "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione".

Il presente rapporto, che raccoglie la descrizione delle attività condotte da FN nell'ambito degli obiettivi A e B dell'Accordo di collaborazione con ENEA, costituisce il deliverable previsto dallo stesso Accordo.



## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 *Revisione critica della configurazione di griglia*

Partendo dai risultati ottenuti nella precedente annualità, in cui FN aveva sviluppato sia la progettazione sia la realizzazione di un primo prototipo di griglia per elementi di combustibile LFR - DEMO ALFRED, si è proceduto ad una revisione critica di tale configurazione.

Sulla base di scambi di valutazioni tecniche avvenute durante riunioni del “Tavolo Pesante” cui anche FN ha partecipato (si citano alcune date: Saluggia, 2 dicembre 2013, Lerici 14 marzo 2014), nonché in riunioni specificatamente dedicate, sono emerse riflessioni circa alcuni aspetti della tipologia di griglia proposta da FN a confronto con l’idea di input di Ansaldo/ENEA. Per comodità di lettura, in Figura 1 si riportano alcune immagini delle due configurazioni sotto esame. In Figura 1 le scale non sono le stesse, ma le dimensioni della griglia per entrambe le configurazioni sono uguali, ossia 20 mm di altezza di ciascuna componente, con la lunghezza variabile a seconda della posizione nella griglia stessa in funzione della geometria esagonale del fascio di barrette.

Una delle principali differenze fra le due tipologie consiste nella presenza di due uncini (versione di input) o in un unico aggancio centrale (versione FN). La prima configurazione risultava più idonea ad alcuni aspetti legati alla fluidodinamica del refrigerante, sebbene fosse più debole dal punto di vista della resistenza meccanica (soprattutto viste le dimensioni degli uncini) e più onerosa in termini di realizzazione, soprattutto se considerata su scala industriale. Allo scopo, si è ritenuto utile, insieme ad ENEA ed Ansaldo Nucleare, procedere ad una verifica a livello di calcoli di fluidodinamica e di meccanica, circa la possibilità di impiegare la configurazione ad unico uncino proposta da FN, con eventuali modifiche, al fine di definire una soluzione che potesse, in qualche modo, portare ad un ragionevole compromesso fra funzionalità e realizzabilità.

Da tale verifica è emersa la revisione della griglia in questione, il cui disegno di massima è riprodotto in Fig. 2, mentre in Allegato sono inseriti i disegni esecutivi di ciascun componente completi delle terminazioni e degli agganci alla scatola esagonale.

La nuova configurazione presenta un singolo uncino, gli appoggi fissi costituiti da un contatto puntiforme e l’altezza di ciascuna componente di griglia aumentata di 10 mm rispetto all’idea originale, in modo da ottenere un oggetto più resistente (quindi si passa da 20 mm di altezza a 30 mm, non inficiando la fluidodinamica del refrigerante).

La Fig. 3 riporta, a titolo esemplificativo, il profilo di una componente (la due) dopo stampaggio e piegatura.

Soprattutto per quanto riguarda gli appoggi fissi, si è visto come fosse necessario mantenerne tre cercando di avere un contatto non sulla generatrice della bugna ma di tipo puntiforme, modellando in modo opportuno le bombature, come si può vedere dal particolare riportato in Fig. 4.



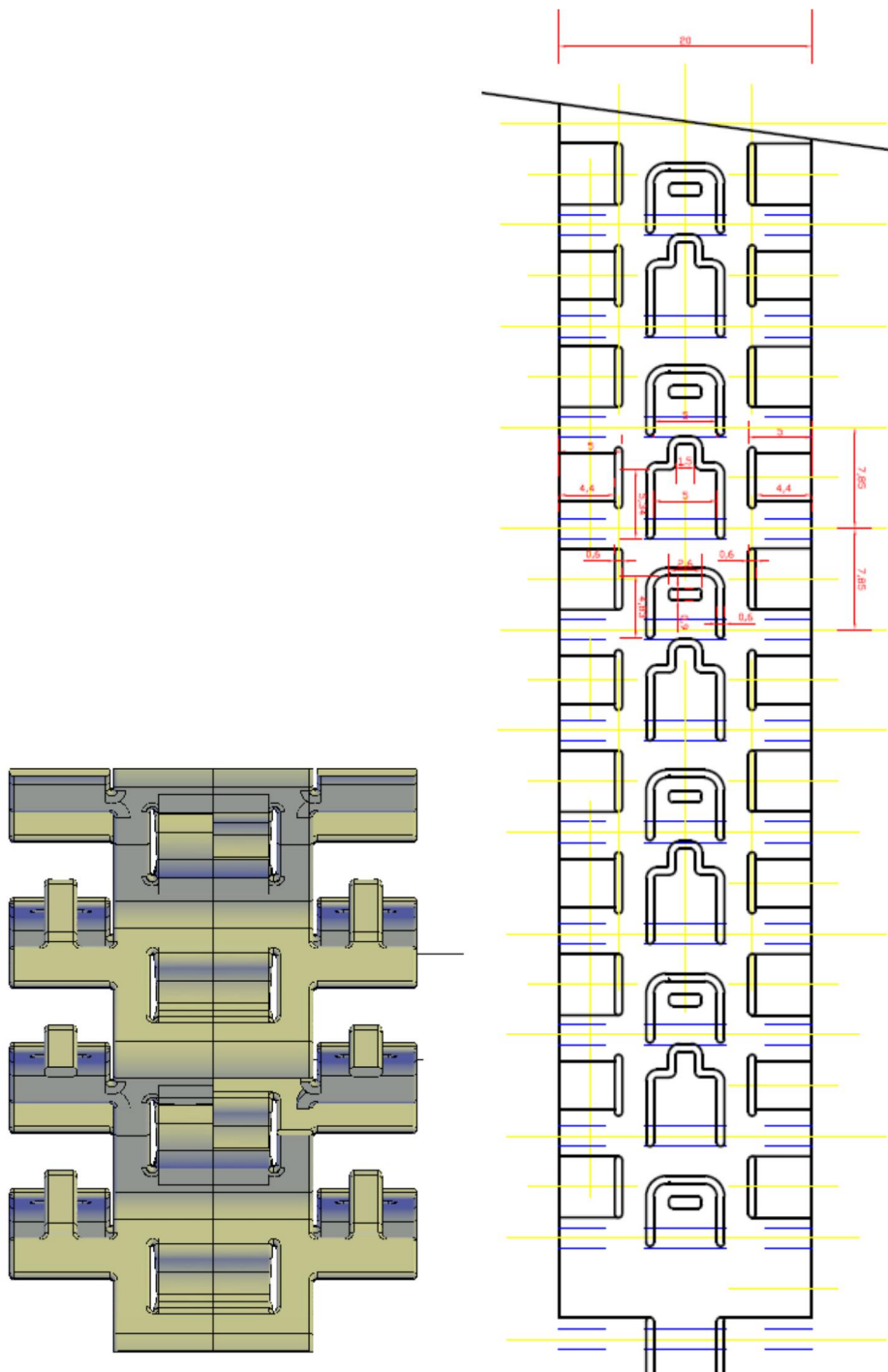


Figura 1. A sinistra: vista dall'alto della griglia di input ANN/ENEA, a destra proposta FN

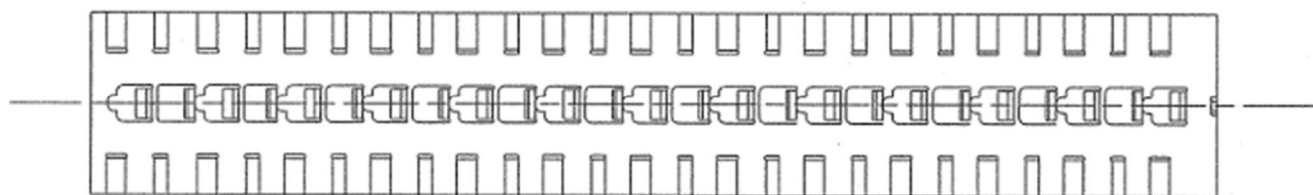


Figura 2. Nuova configurazione: porzione centrale, zona modulare

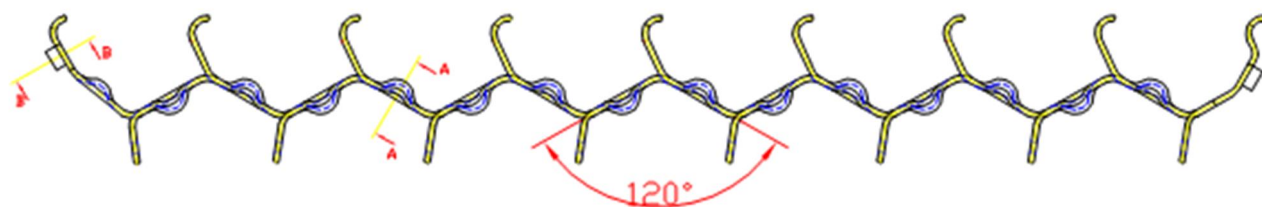


Figura 3. Nuova configurazione: vista frontale componente 2 della griglia

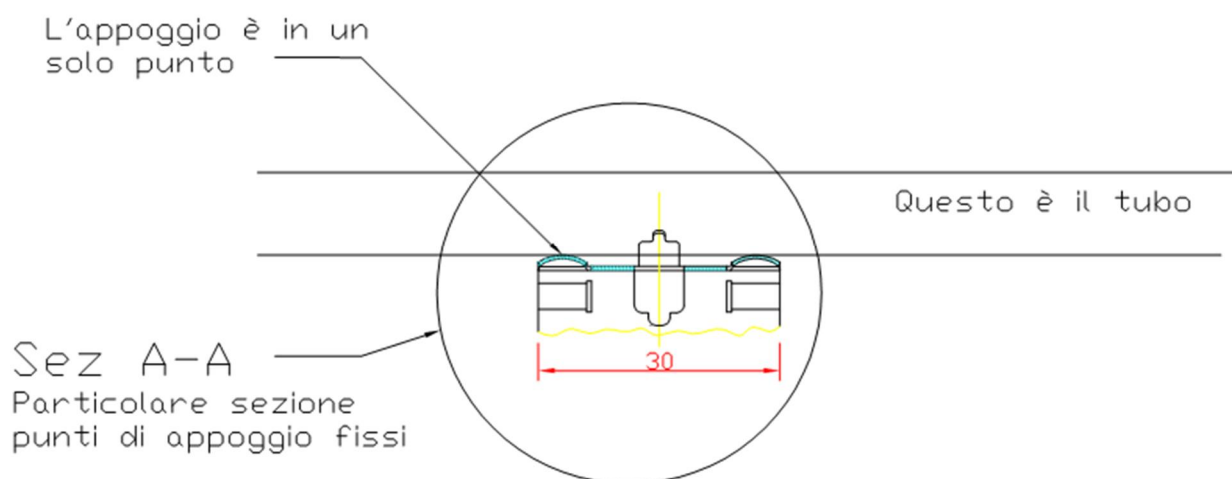
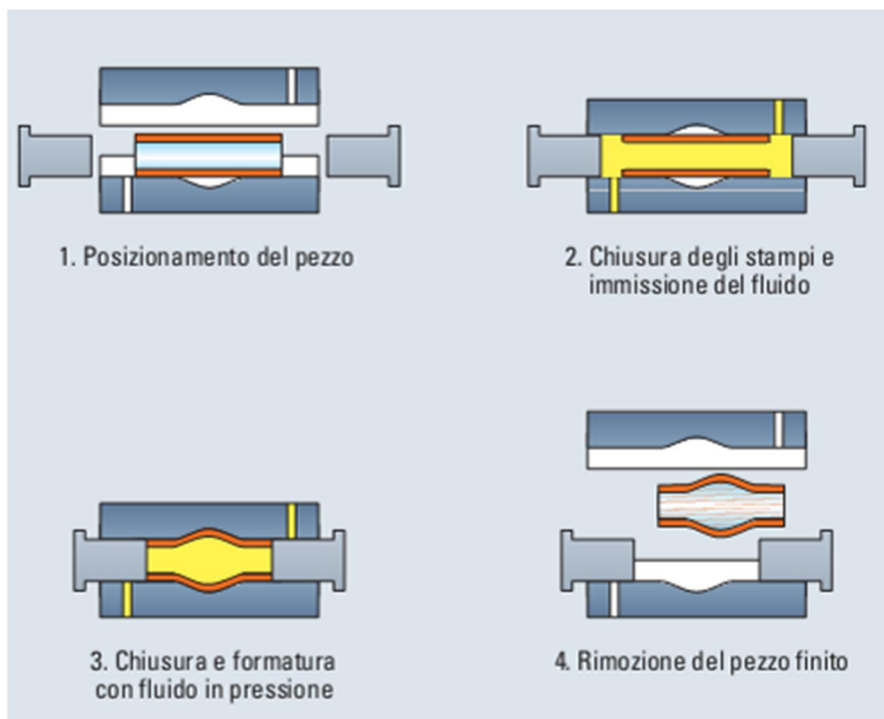


Figura 4. vista laterale della sezione dei punti di appoggio fissi

E' stata effettuata una prima valutazione delle problematiche di assemblaggio del fascio all'interno della scatola esagonale, che tenessero conto anche della necessità di non introdurre punti deboli, come saldature o grani, che potevano sicuramente agevolare il fissaggio della griglia alle pareti del tubo esagonale ma che sarebbero stati fonte di corrosione preferenziale. Sono state prese in considerazione anche ipotesi come l'impiego di elementi falsi che fungessero da punti di collegamento con la modifica delle geometrie, ma ciò poteva portare alla non corretta circolazione del refrigerante e quindi sono state scartate.

Si è poi tenuto conto del fatto che, per la realizzazione delle scatole esagonali in geometria ALFRED, anziché impiegare i processi tradizionali di estrusione o colatura, che comportano tolleranze dimensionali non costanti, si può utilizzare una tecnologia piuttosto recente, l'idroformatura. Si tratta di una tecnica di stampaggio per acciaio e leghe leggere, impiegata attualmente soprattutto nel settore automobilistico. Consiste nel deformare tubi, profilati estrusi o lamiere all'interno di uno stampo sfruttando la pressione di un fluido (ad esempio acqua) che agisce direttamente sul materiale da deformare. Le superfici della cavità dello stampo hanno la sola funzione di contenere la deformazione del pezzo realizzata dal fluido in pressione (vedi schema di massima di tale tecnica in Fig. 5). L'idroformatura, a bassa o alta pressione (a seconda che si utilizzi una pressione di processo inferiore o superiore a 83 MPa), comporta maggiori costi rispetto alle tecniche di stampaggio tradizionali, ma ha il vantaggio di consentire la realizzazione con una sola operazione di stampaggio di particolari anche molto complessi. Con questa tecnica, che è utilizzabile per manufatti di modesto spessore (come ad esempio la scatola esagonale), si possono ottenere variazioni di sezione in senso longitudinale e migliore stabilità dimensionale.

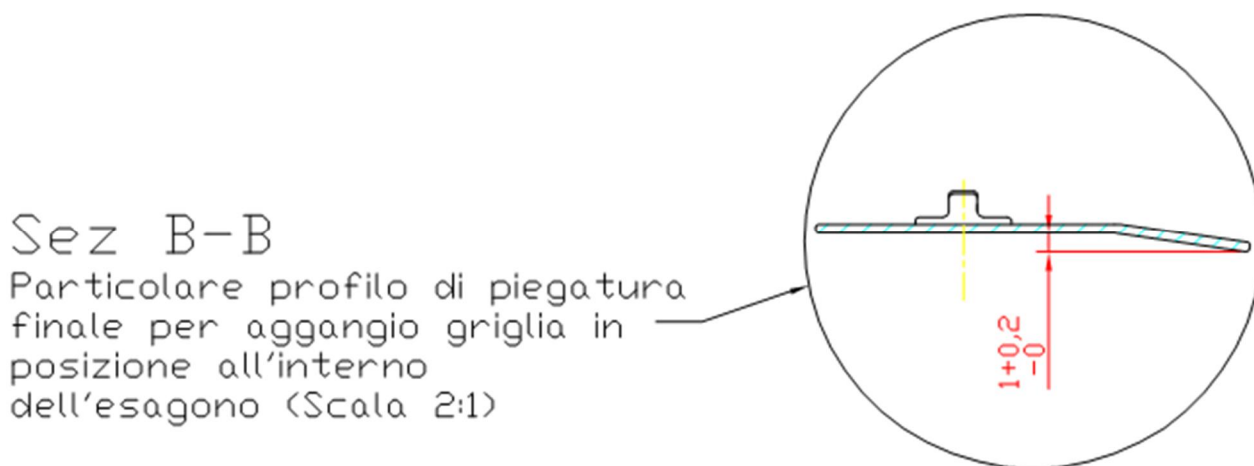


**Figura 5. Sequenza di stampaggio di un tubo di forma particolare mediante idroformatura**

Tenendo anche conto, quindi, della possibilità di avere scatole esagonali ottenute per idroformatura, cioè con tolleranze di fabbricazione molto buone e costanti, si è ipotizzata la

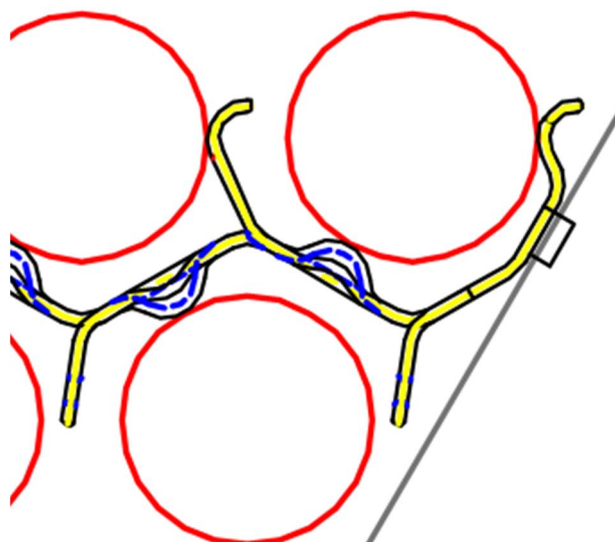


proposta di modifica della terminazione delle componenti di griglia come riportato nel particolare visibile in Fig. 6a. In pratica è stata allungata la linguetta che deve flettere nel momento dell'introduzione e poi rilasciarsi nel punto in cui trova la sua sede, agganciandosi così alla scatola esagonale.



**Figura 6a. Particolare del profilo di piegatura finale per aggancio griglia in posizione all'interno della scatola esagonale**

Nella Fig. 6b è riportato il particolare dell'aggancio griglia-parete del tubo esagonale.



**Figura 6b. Particolare stilizzato dell'aggancio griglia-parete tubo esagonale**

## 2.2 Verifica dell'impatto delle caratteristiche dei materiali rispetto alla lavorazione di piegatura con particolare riguardo alla direzione delle fibre

Al fine di ottenere le componenti di griglia, è necessario sottoporre la lamiera di acciaio ad operazioni di taglio, stampaggio e piegatura. Nel paragrafo successivo si darà più ampia descrizione delle tecniche individuate per il ciclo di lavoro e dei limiti da tenere in considerazione per ciascuna di esse. In questa sezione si vuole approfondire le problematiche legate al processo di piegatura, fase molto critica anche a causa dei materiali da lavorare e del loro possibile incrudimento, reso necessario per migliorare la resistenza allo swelling e per ottenere l'effetto molla ad alte temperature.

La piegatura è una lavorazione di deformazione plastica successiva alla sagomatura. La deformazione permanente della lamiera viene provocata da una sollecitazione di flessione che deve superare il limite di elasticità del materiale. E' importante quindi conoscere bene le caratteristiche del materiale da processare al fine di utilizzare gli accorgimenti adatti.

In Fig. 7 sono riportati dei diagrammi indicativi trazione-allungamento relativi a quattro tipi di acciaio, tre inox (AISI 304 austenitico solubilizzato, AISI 410 martensitico ricotto, AISI 430 ferritico ricristallizzato) e di un comune acciaio al C. Gli acciai martensitici e ferritici presentano praticamente lo stesso tipo di diagramma nel quale si osserva un andamento simile a quello dell'acciaio al C, con un limite di snervamento ben marcato; i valori di carico di rottura e di snervamento degli acciai ferritico e martensitico sono più elevati dell'acciaio al C.

L'acciaio austenitico ha un comportamento diverso: non presenta un carico di snervamento definito e quindi non ammette un vero e proprio limite di collasso. Il carico di rottura e l'allungamento a rottura sono molto più elevati.

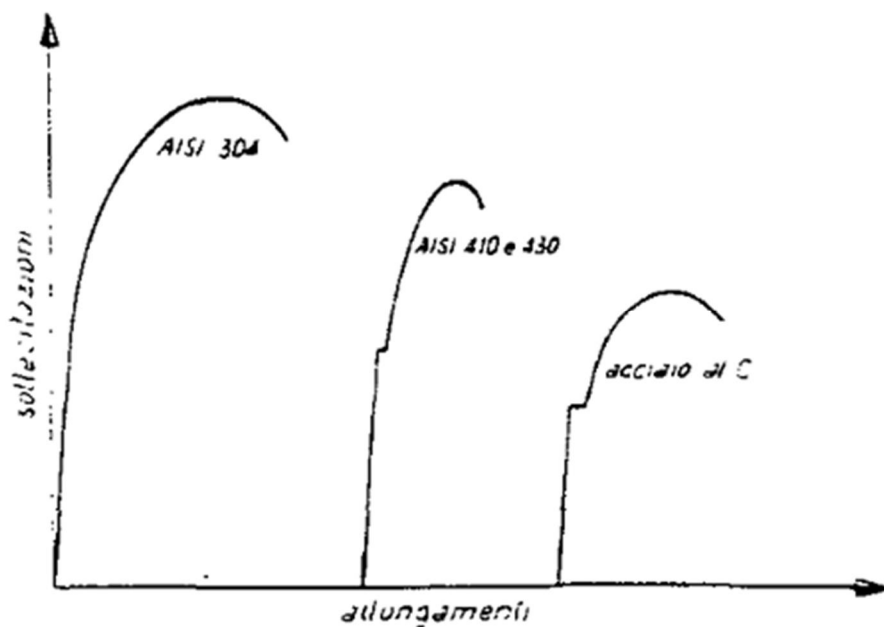


Figura 7 – Diagrammi indicativi trazione- allungamento per acciai inox (austenitico, martensitico, ferritico) e per un comune acciaio al C [1]

Nei diagrammi seguenti [1] sono mostrati, a titolo esemplificativo, l'andamento di alcune caratteristiche man mano che gli stessi campioni di acciaio presi in oggetto vengono deformati in

modo permanente; si tratta in particolare dell'andamento del di carico di rottura (Fig. 8), del carico di snervamento (Fig. 9), dell'allungamento a rottura (Fig. 10) e della durezza (Fig. 11).

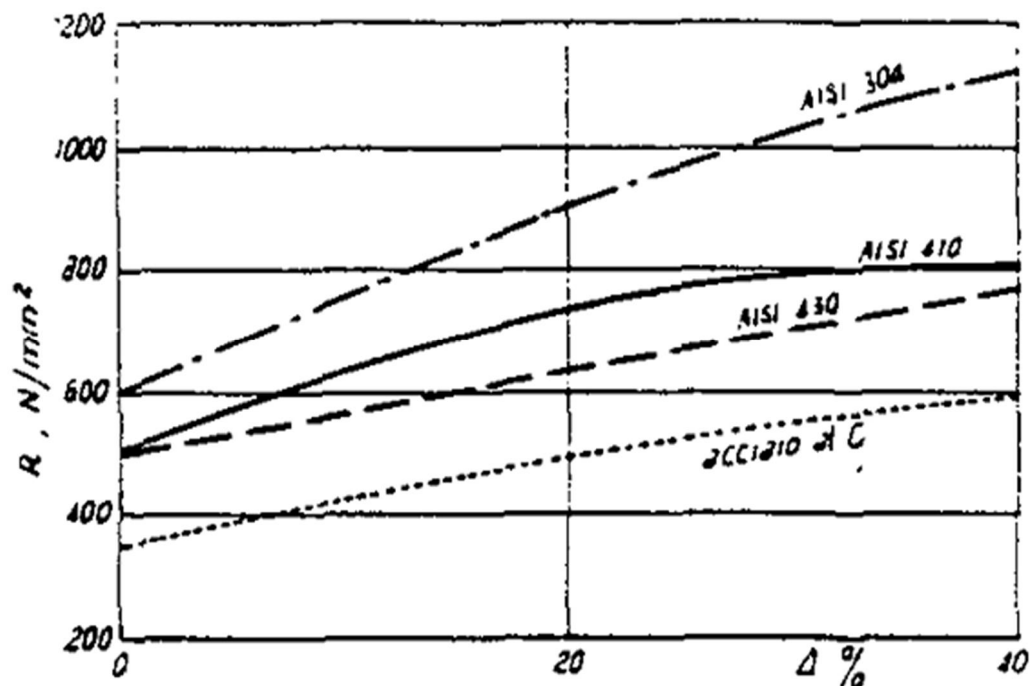


Figura 8 – Andamento dei carichi di rottura per acciai inox (austenitico, martensitico, ferritico) e per un comune acciaio al C in funzione delle deformazioni a freddo espresse in riduzioni percentuali di sezione

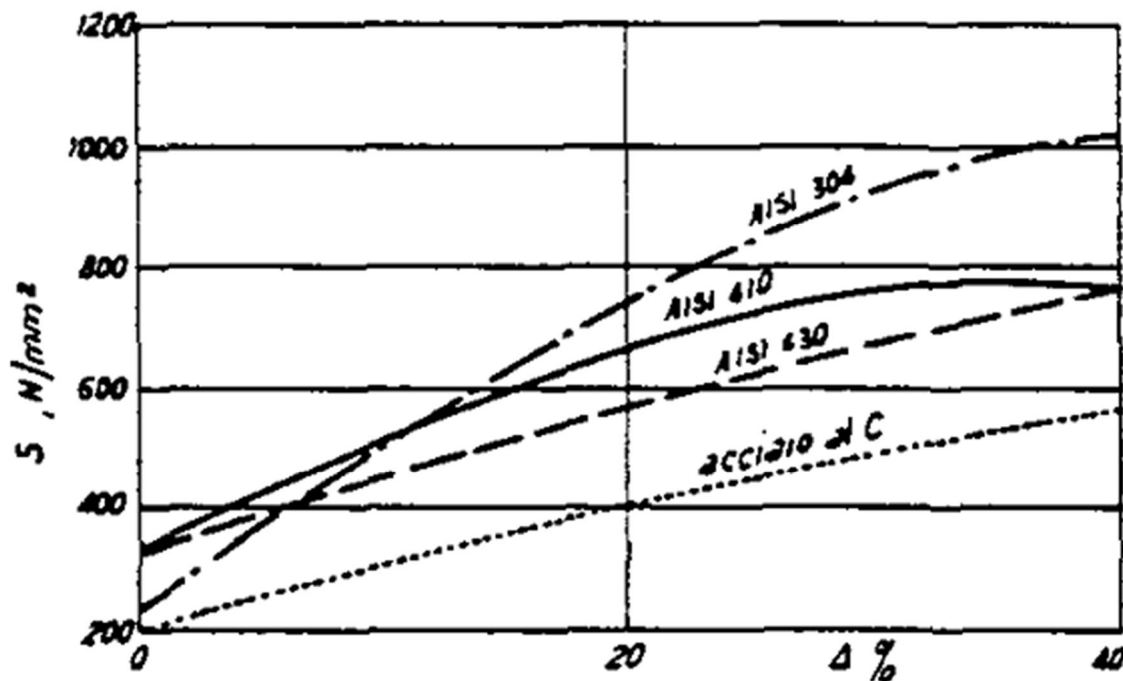


Figura 9 – Andamento dei carichi di snervamento per acciai inox (austenitico, martensitico, ferritico) e per un comune acciaio al C in funzione delle deformazioni a freddo espresse in riduzioni percentuali di sezione

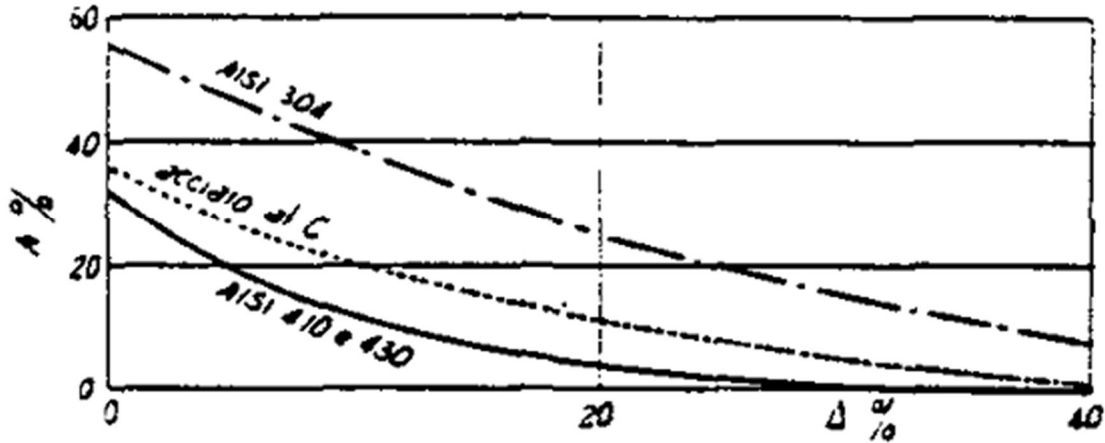


Figura 10 – Andamento degli allungamenti a rottura(tratto utile 50 mm) per acciai inox (austenitico, martensitico, ferritico) e per un comune acciaio al C in funzione delle deformazioni a freddo espresse in riduzioni percentuali di sezione

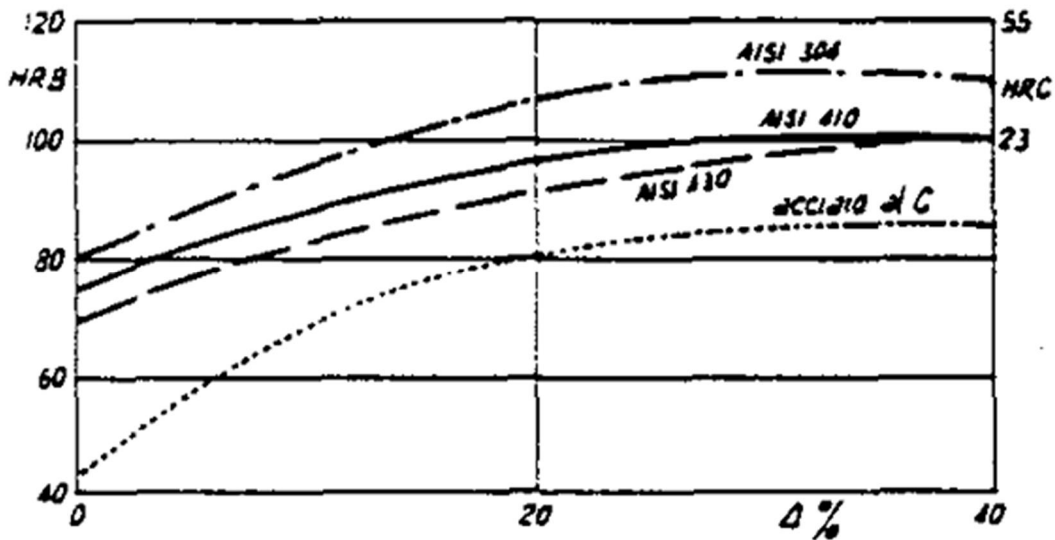


Figura 11 – Andamento delle durezze per acciai inox (austenitico, martensitico, ferritico) e per un comune acciaio al C in funzione delle deformazioni a freddo espresse in riduzioni percentuali di

Osservando i grafici si può notare come gli acciai del tipo martensitico e ferritico diano risultati abbastanza in accordo tra loro e con l'acciaio al C, mentre gli andamenti dell'acciaio di tipo austenitico siano diversi. Nel corso delle lavorazioni il materiale varierà le sue caratteristiche resistenziali in modo diverso da quelle degli acciai comuni; ad esempio, l'aumento del carico di snervamento darà luogo, nelle lavorazioni per deformazione plastica (come la piegatura), ad un ritorno elastico per gli acciai austenitici ben maggiore di quello che si riscontra nei comuni acciai al C. Nella Fig. 12 si può vedere esemplificata, in modo schematico, la diversità di comportamento nel caso della semplice piegatura a 90° di tre lamiere di acciaio al carbonio, di acciaio inox austenitico solubilizzato e austenitico incrudito.

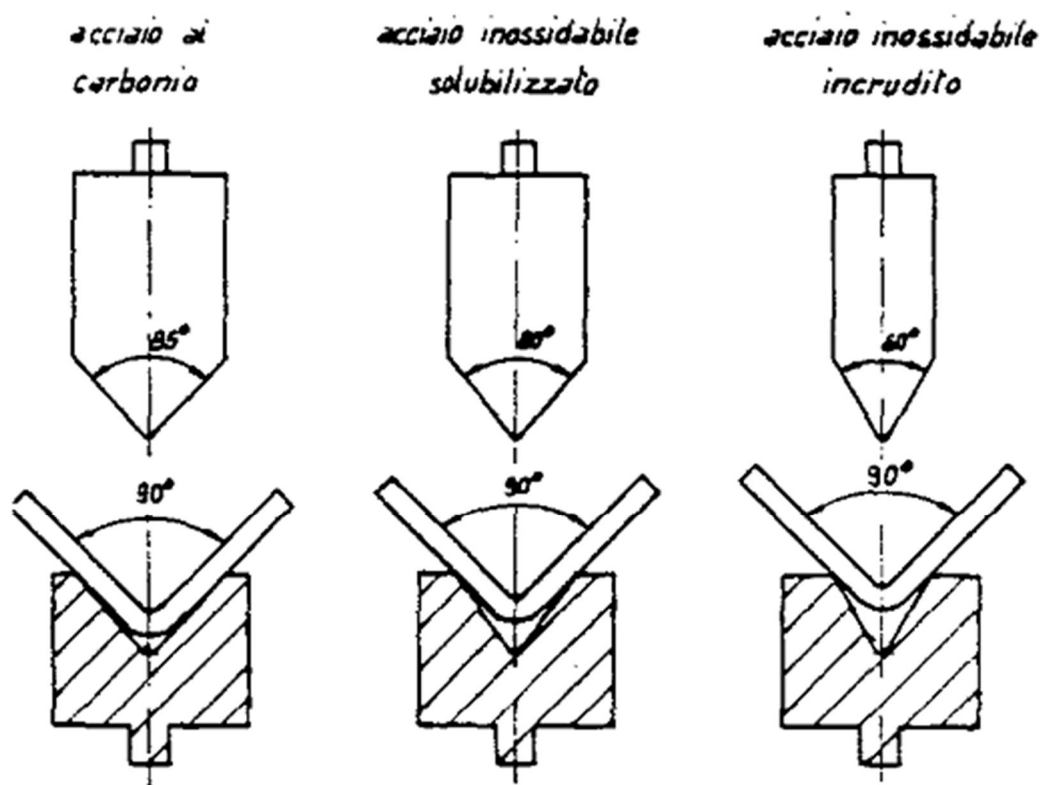


Figura 12 – Indicazione qualitativa dei diversi ritorni elastici rilevabili durante la piegatura a 90° di lamiera di acciaio al C, di acciaio austenitico solubilizzato e di acciaio austenitico fortemente incrudito [1]

Quando viene eseguita una piega il materiale si trova in uno stato compresso sul lato interno della piega mentre risulta trazionato su quello esterno: si viene così a creare un gradiente di sollecitazione e di deformazione trasversale allo spessore del materiale per cui le fibre interne sono sottoposte a compressione mentre quelle esterne a trazione e per il quale l'entità della deformazione decresce in intensità allontanandosi dall'asse neutro (vedi Fig. 13).

Le proprietà del materiale che più influenzano il processo di piega sono lo sforzo di snervamento, la temperatura di transizione fragile-duttile e la direzione di laminazione della lamiera di partenza. Infatti, maggiore è lo sforzo di snervamento maggiore sarà la forza da applicare necessaria e quindi la difficoltà nella piegatura che risulta in cricche nella zona di piega e nel ritorno elastico.

La direzione di laminazione risulta per la piega un fattore molto più influente che in altre lavorazioni: la piega effettuata parallelamente alla direzione di laminazione risulta la meno favorevole e può dare luogo a cricche. Le soluzioni sono incrementare il raggio di piega o, se possibile, cambiare la direzione di piega. Tale problematica diventa ancora più importante quando lo spessore della lamina del materiale da lavorare aumenta (ordine della decina di mm). In tali casi viene consigliato di piegare con un raggio almeno il doppio rispetto allo spessore o eseguire una laminazione preliminare leggera nella direzione trasversale alla prima.



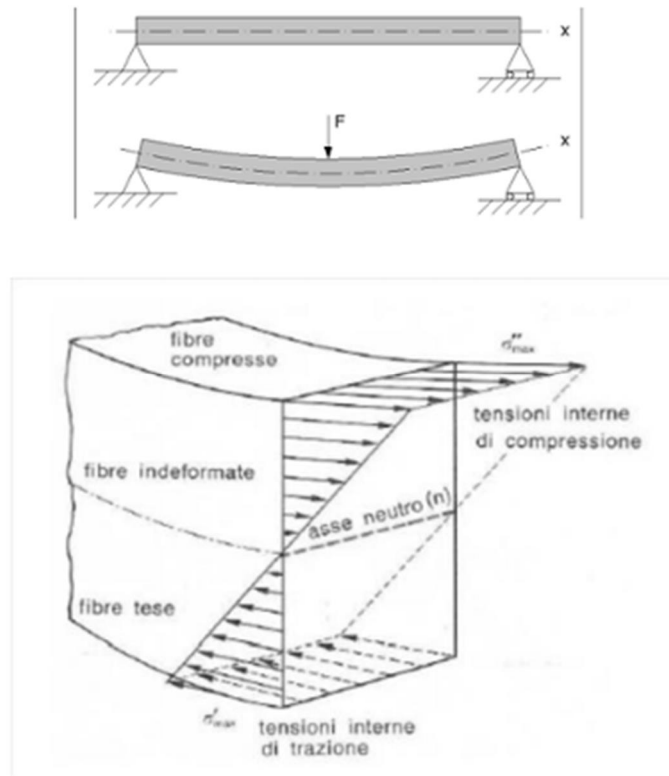
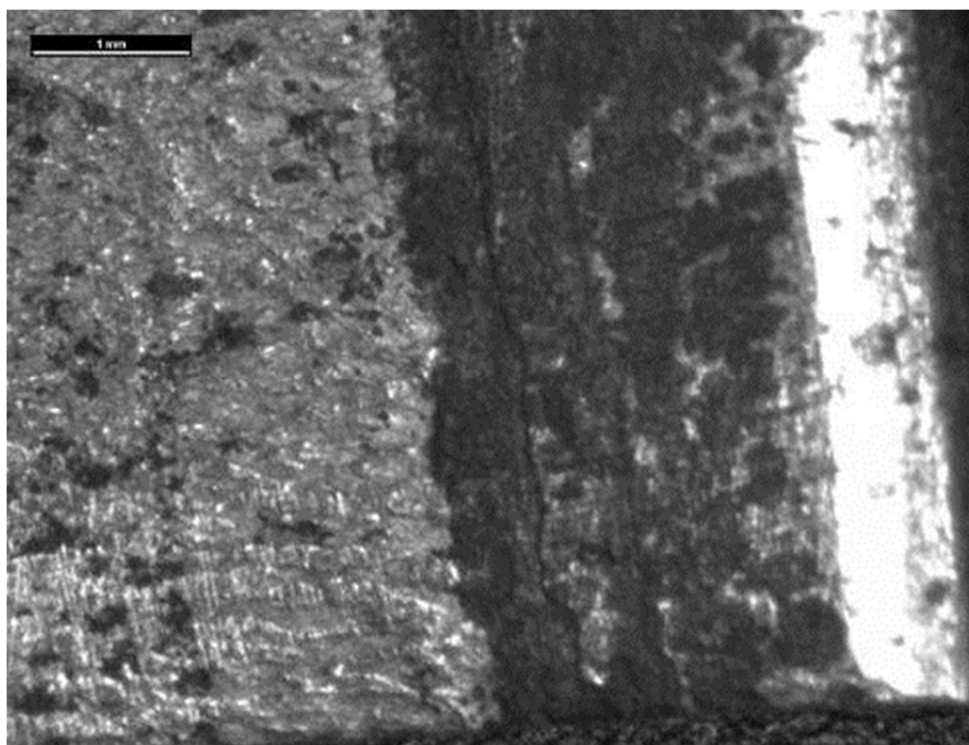


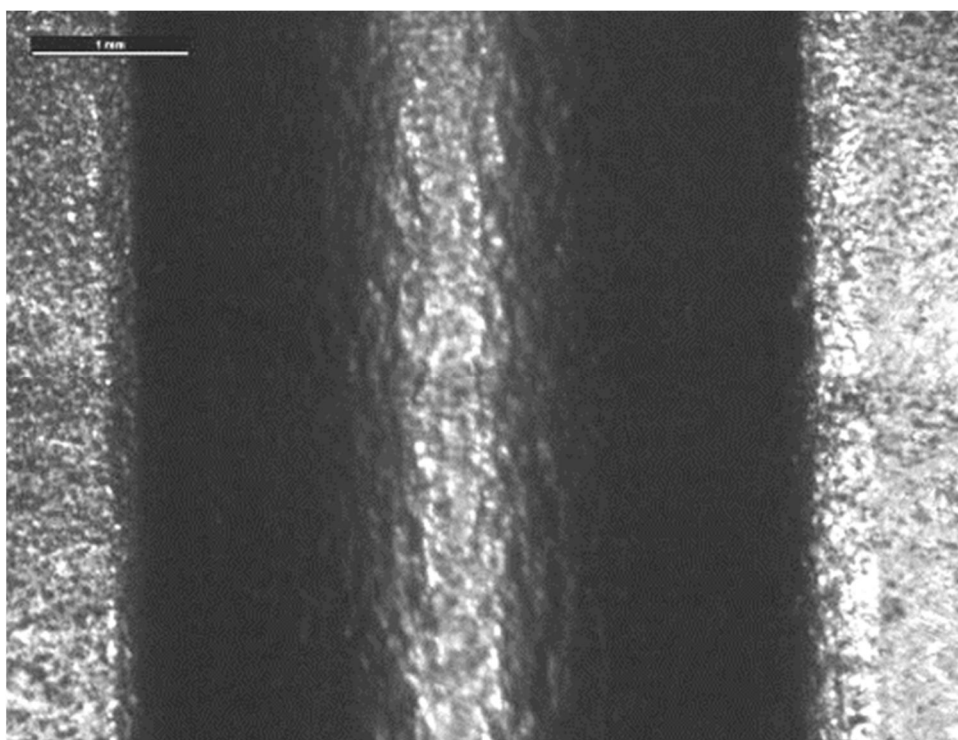
Figura 13 – Rappresentazione dello stato tensionale di un corpo sottoposto a piega ( $\sigma = My/J$ ) [2]

Nel caso specifico del materiale da impiegare per la realizzazione della griglia, appartenente al gruppo degli acciai inox austenitici e, considerando che, per migliorarne il comportamento allo swelling e avere una sorta di effetto molla in temperatura, è consigliabile incrudirlo almeno sino al 15-25%, la piegatura rappresenta la fase più critica del processo di realizzazione della griglia. Al fine di verificare sperimentalmente il comportamento del materiale sono state effettuate alcune prove di piega confrontando lo stesso materiale (acciaio inox austenitico al Ti) fortemente incrudito (50%) e incrudito al 30 % circa.

Nelle figure seguenti sono riportate alcune immagini prese allo stereo microscopio (Leyka) su campioni processati in condizioni estreme: Fig. 14a lamina incrudita al 50% piegata in direzione parallela a quella di laminazione (presenza di cricche), in Fig. 14b lamina incrudita al 30 % (con trattamento termico prima dell'ultima passata di incrudimento) piegata in direzione ortogonale a quella di laminazione (assenza di cricche).

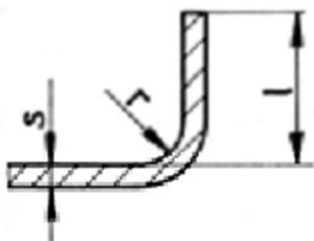


**Figura 14a – Immagine allo stereo microscopio della zona affetta da cricche (acciaio austenitico incrudito al 50%, piega parallela alla direzione di laminazione)**



**Figura 14b – Immagine allo stereo microscopio di piega con assenza di cricche (acciaio austenitico incrudito al 30%, direzione perpendicolare alla laminazione)**

Per quanto riguarda le tolleranze generali di piegatura a freddo, si sono considerate le indicazioni di seguito riportate relative al rapporto fra  $r$  (raggio di curvatura) ed  $s$  (spessore della lamina da piegare) (vedi schema in Fig. 15).



**Figura 15 – Raggio di piegatura e spessore del componente**

I proporzionamenti di massima comunemente adottati sono:

- per l'acciaio dolce o altri materiali duttili:  $r \geq s$
- per acciai ad alta resistenza  $r \geq 4s$
- $l \geq 2s \div 4s$  e comunque per evitare distorsioni:  $l \geq 3 \text{ mm}$  (per lamiere sottili)  
 $l \geq 4.5 \text{ mm}$  (per lamiere spesse).

Le tolleranze ottenute rientrano in quelle generalmente ottenute mediante piegatura, ossia:-

- per pezzi corti e molto piccoli  $\pm 0.4 \text{ mm}$
- per pezzi di piccole dimensioni ( $< 150 \text{ mm}$ )  $\pm 0.75 \text{ mm}$
- per pezzi di medie dimensioni ( $> 150 \text{ mm}$ )  $\pm 1.5 \text{ mm}$ .

Si riportano anche le tolleranze di piegatura riportate dalla Norma DIN 6935, riferite a spessori inferiori a 3 mm, per acciai a diverso carico di rottura:

carico di rottura dell'acciaio  $\leq 400 \text{ N/mm}^2$  : scostamento max su  $r + 0.5 \text{ mm}$

carico di rottura dell'acciaio  $> 400 \leq 500 \text{ N/mm}^2$  : scostamento max su  $r + 0.8 \text{ mm}$

carico di rottura dell'acciaio  $> 500 \leq 650 \text{ N/mm}^2$  : scostamento max su  $r + 1.0 \text{ mm}$



### 2.3 Foto - tranciatura chimica e tecniche tradizionali a confronto

Una delle tecnologie individuate per la sagomatura è la foto tranciatura chimica in alternativa alla tranciatura tradizionale.

Tale processo è stato preso in considerazione in funzione degli spessori in gioco, delle caratteristiche finali del componente da ottenere e della compatibilità dei materiali con il processo in questione.

La tranciatura chimica differisce dalla tranciatura meccanica delle lamiere metalliche per la modalità di asportazione del materiale, dovuta alla dissoluzione chimica invece della deformazione plastica. Tipiche applicazioni di questa tecnica si hanno nella realizzazione di circuiti stampati o nella tranciatura di lamierini sottili che risultano così esenti da bave di lavorazione. In particolare la foto tranciatura chimica è una variante della fresatura chimica: il materiale viene asportato, solitamente da lamiere di spessore molto sottile, mediante una tecnica di fotoincisione. In questo modo possono essere tranciati profili molto complessi anche su lamierini da 0.0025 mm, evitando la formazione di bave tipiche dei processi convenzionali.

La sequenza di operazioni tipica della tranciatura fotochimica consiste dei seguenti passaggi:

1. la geometria da tranciare viene ingrandita fino a 100 volte in fase di disegno del pezzo. Viene quindi realizzato un negativo fotografico in modo da ridurre le dimensioni mantenendo una data definizione dei contorni.
2. Il lamierino da tranciare viene ricoperto da un liquido fotosensibile (foto resistore) mediante immersione, pennellatura o a spruzzo. Successivamente lo strato di protezione viene fatto essiccare in forno.
3. Il negativo viene proiettato sulla superficie da lavorare utilizzando una lampada a luce ultravioletta. Si ottiene così un indurimento dello strato di protezione nelle sole zone esposte alla luce.
4. Il lamierino viene quindi trattato come fosse una lastra fotografica. La fase di "sviluppo" elimina il rivestimento nelle zone non esposte in precedenza alla luce ultravioletta.
5. Il lamierino viene immerso in una vasca piena di reagente, come nella fresatura chimica, o spruzzato di reagente che reagisce solo nelle zone non rivestite. Infine il pezzo viene accuratamente lavato.

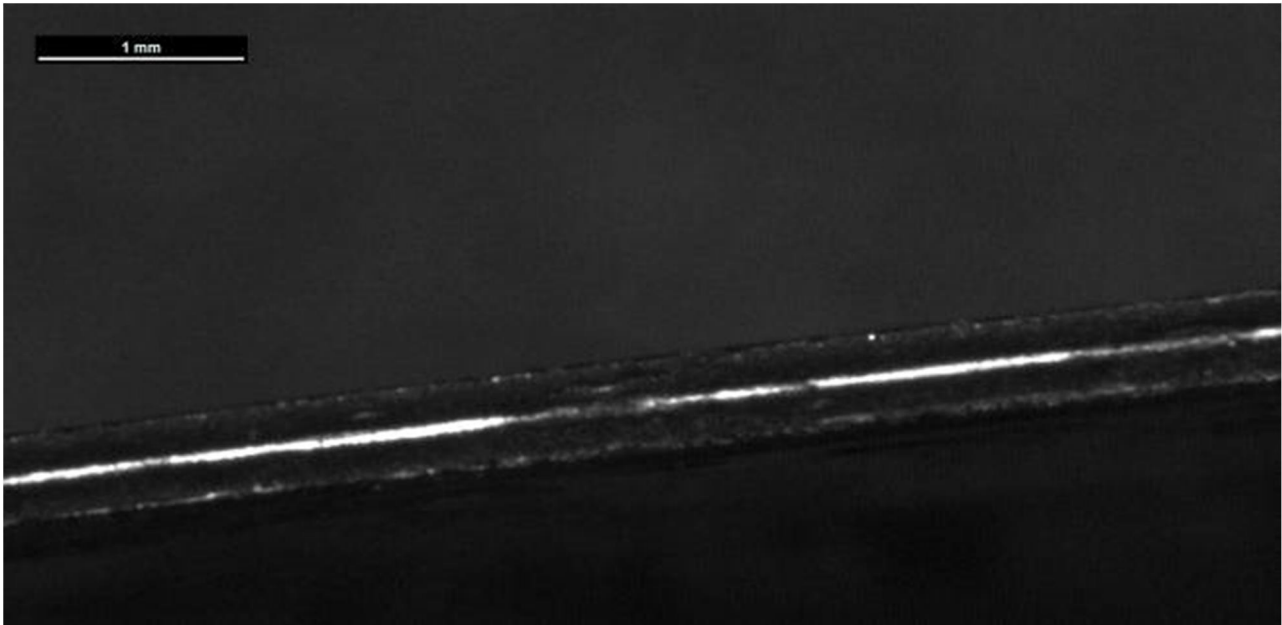
Sebbene sia richiesto l'intervento di operatori specializzati, i costi degli impianti e delle attrezzature richieste sono bassi ed il processo risulta facilmente automatizzabile, anche per una produzione in serie. In generale i tempi di realizzazione sono piuttosto rapidi.

In merito ai limiti di questa tecnica occorre effettuare le seguenti considerazioni tecnologiche e progettuali:

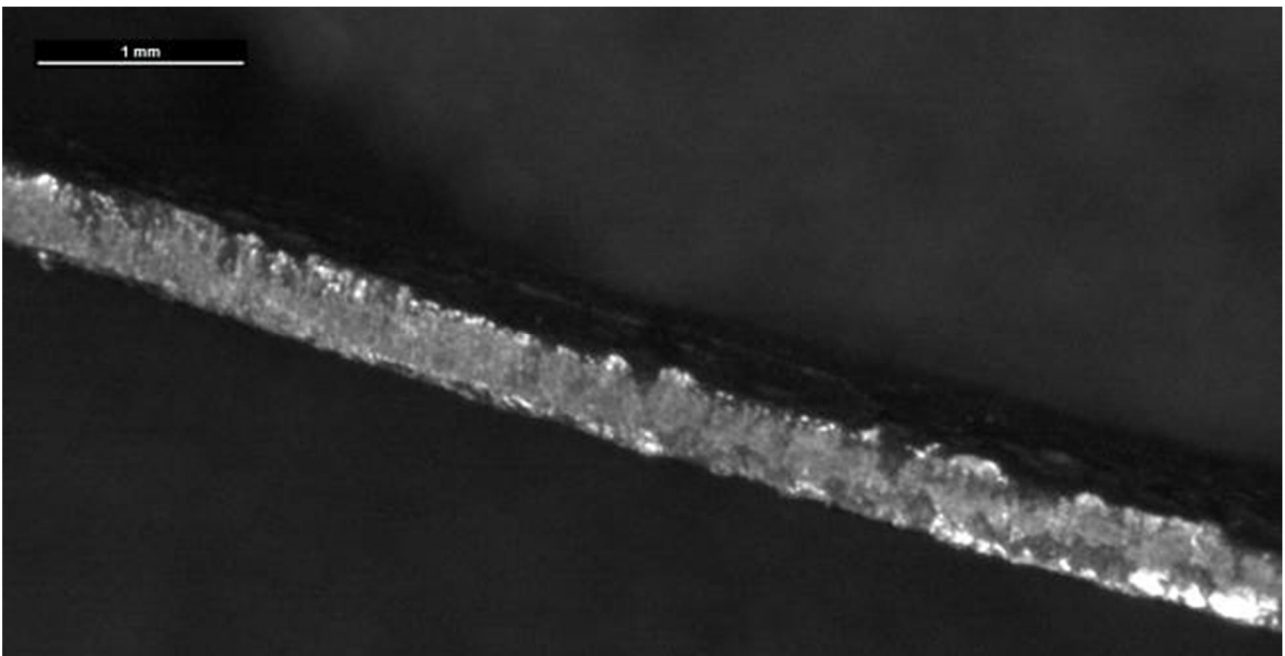
- a causa delle modalità di lavorazione, ed in particolare per l'attacco generalizzato del reagente a tutte le superfici esposte, devono essere evitate geometrie che prevedono angoli molto acuti, rilievi molto pronunciati, cavità profonde e conicità molto precise;
- presentano difficoltà di lavorazione pezzi dalla superficie molto porosa.

Per contro si possono ottenere elevate precisioni dimensionali a partire da  $\pm 0,015$  mm, si ha la totale integrità della struttura molecolare: non vi sono schiacciamenti o stress: le proprietà del materiale non vengono alterate dalla lavorazione. Inoltre, come già esposto, le superfici di taglio si presentano smussate e non si hanno le zone di maggior incrudimento che possono nascere da un taglio effettuato mediante cesoia o trancia, ad esempio.

Al fine di verificare sperimentalmente la qualità della finitura del taglio ottenuto per foto trancitura chimica sono stati analizzati allo stereo microscopio alcuni provini in acciaio inox austenitico (1515 Ti) lavorati mediante questa tecnica, a confronto con altri, sempre dello stesso materiale, nelle stesse condizioni di incrudimento, tranciati tradizionalmente. Di seguito si riportano le immagini ottenute allo stereo microscopio Leyka.



**Figura 16. Particolare del taglio smussato e privo di bave ottenuto mediante foto trancitura chimica (50X)**



**Figura 17. Particolare del taglio ottenuto mediante taglio tradizionale: si nota il profilo non uniforme (50X)**

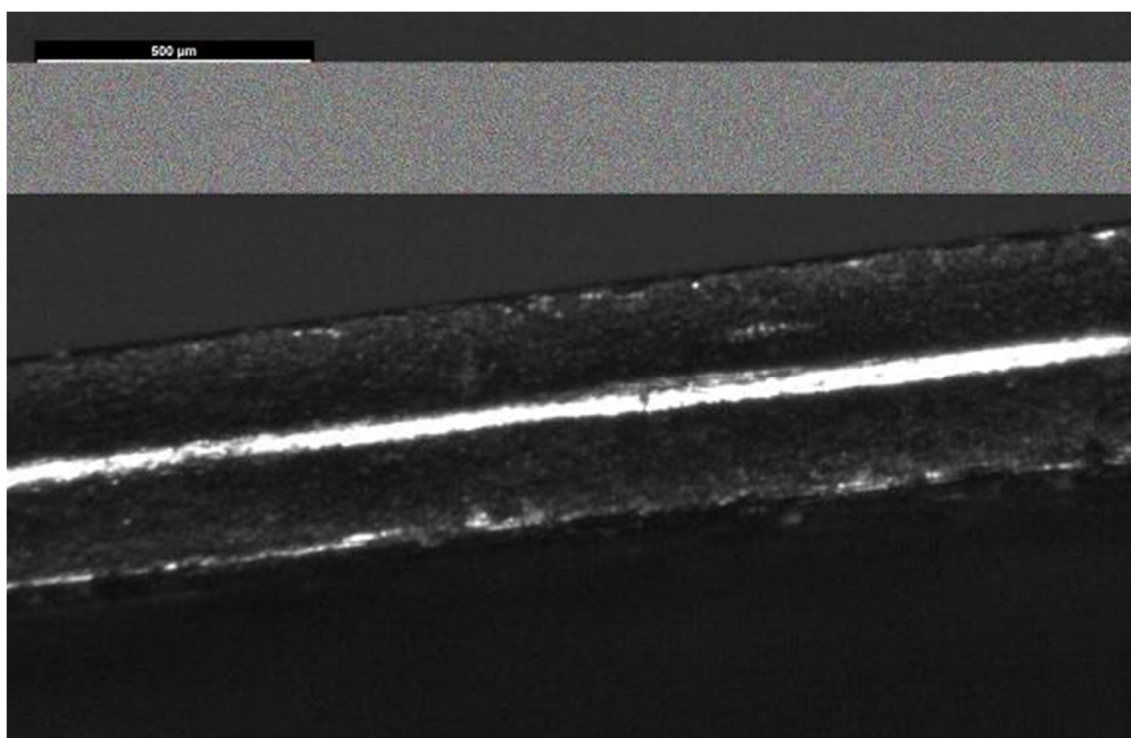


Figura 18. Particolare del taglio smussato e privo di bave ottenuto mediante foto trancitura chimica (150X)

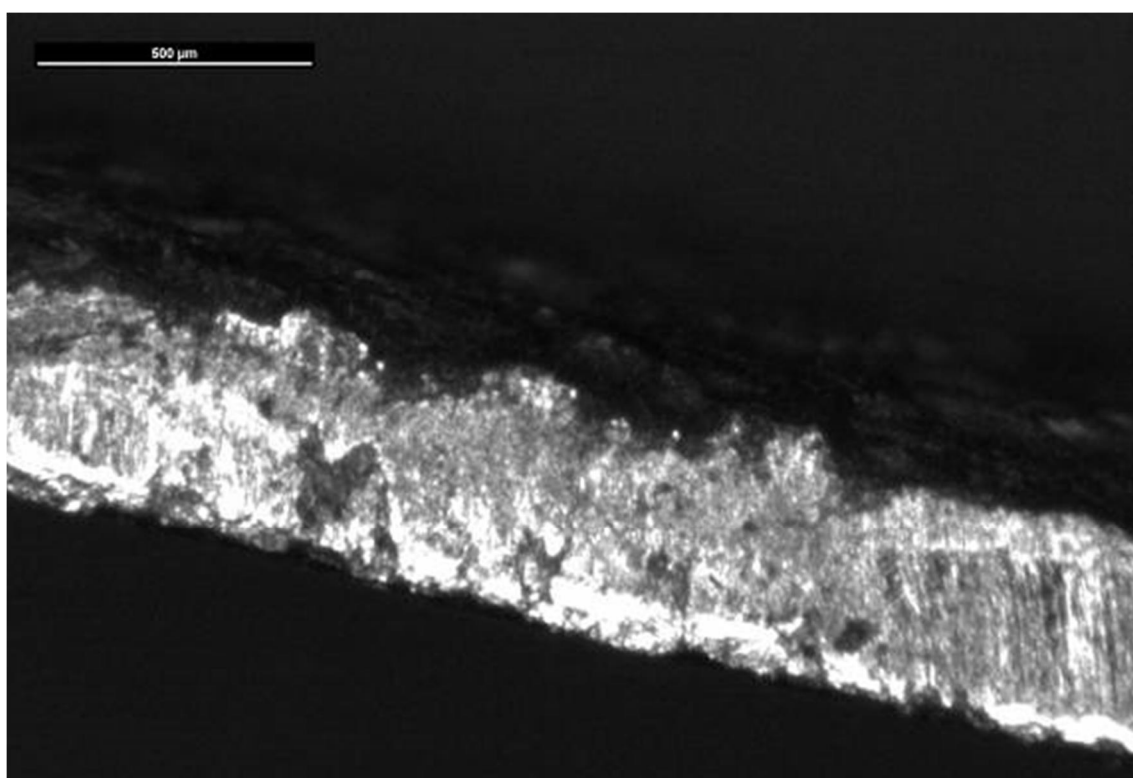
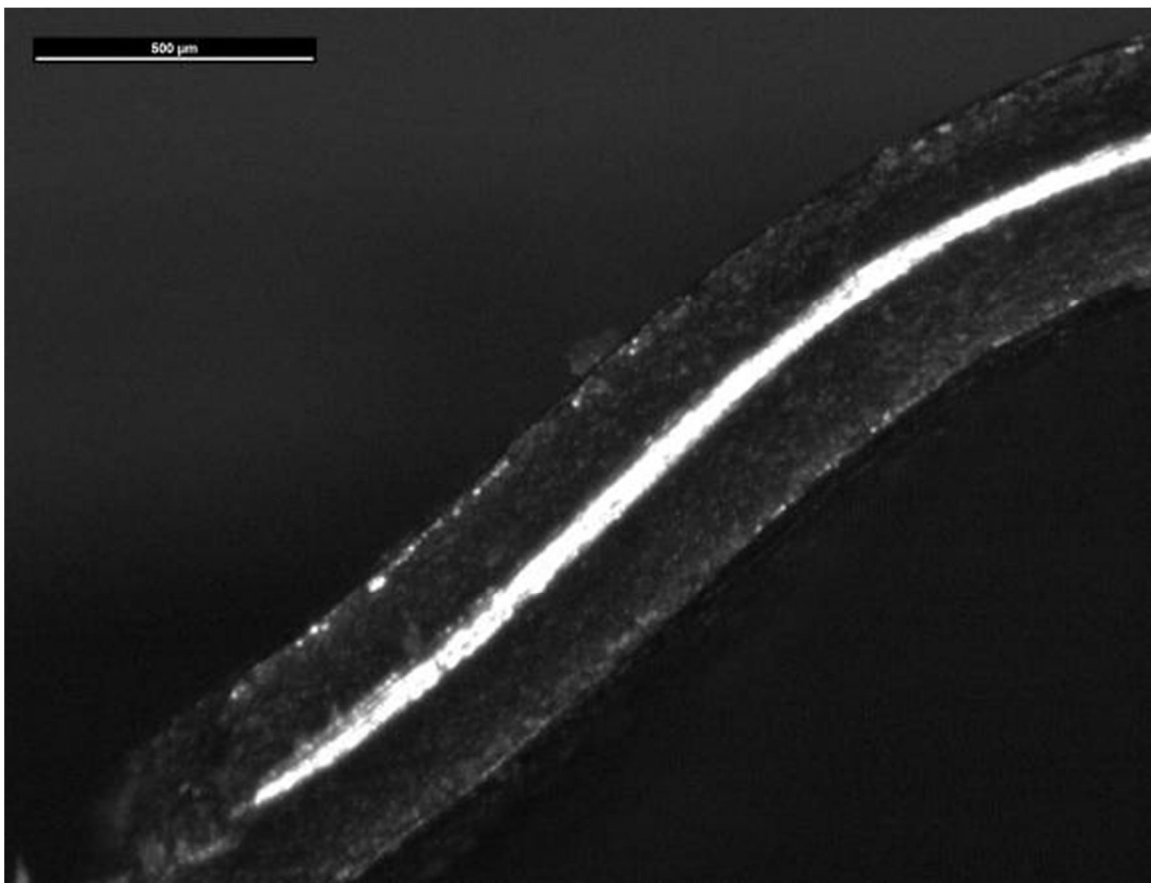


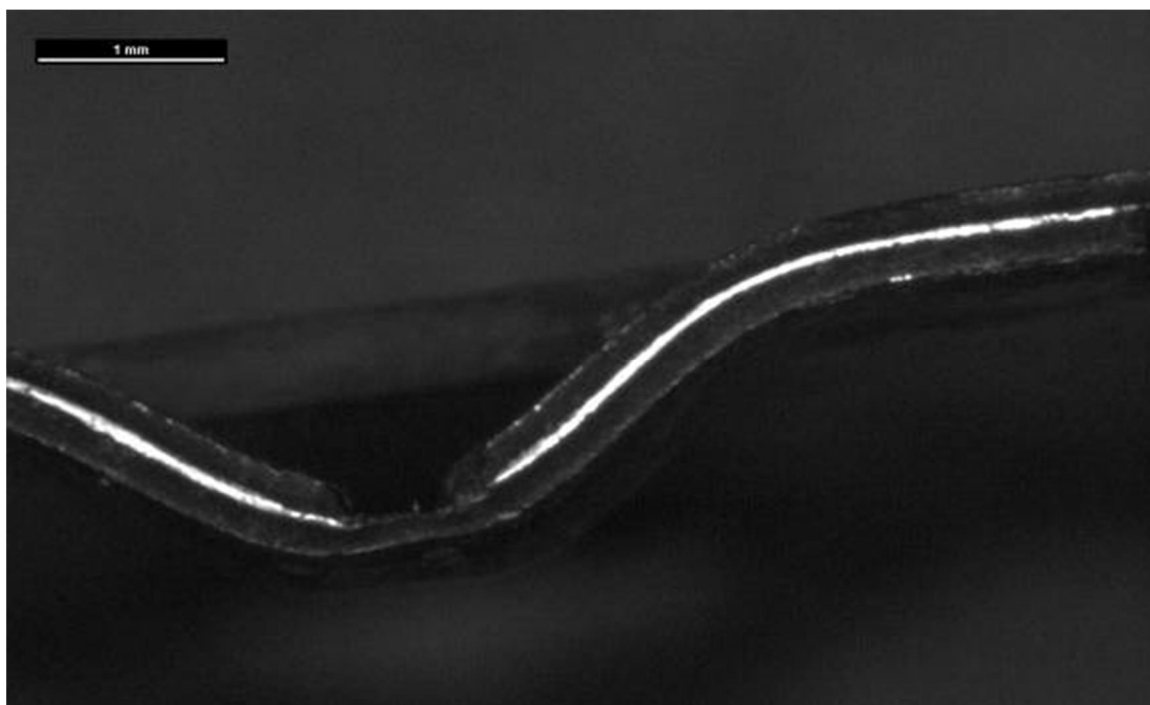
Figura 19. Particolare del taglio ottenuto mediante taglio tradizionale: si nota il profilo non uniforme e zone deformate plasticamente (150X)

Dalle foto si vede, quindi, come la finitura ottenibile dalla foto trancitura chimica sia ottimale e non necessiti di ulteriori lavorazioni, lasciando una superficie priva di spigolosità e asperità taglienti che possono creare inneschi per difetti o problemi di scorrimento/rigature sulle barre che la griglia deve raccogliere.

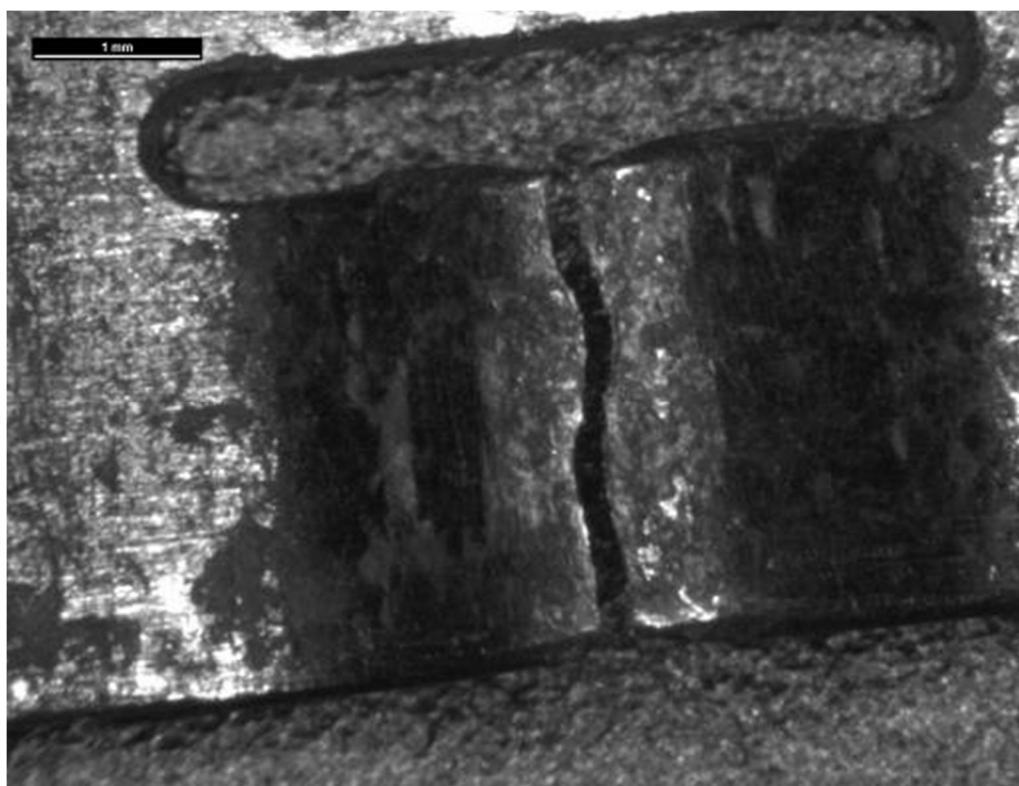
L'indagine è stata effettuata anche su porzioni di lamina sagomate mediante foto trancitura chimica e successivamente sottoposte a piegatura. Come si può vedere nelle Fig. 20 e 21, la finitura è costante e buona, priva di bave su tutto il profilo. Si può notare anche come nella Fig. 21 sia posto in evidenza il solco interno realizzato appositamente per favorire la piegatura manuale e, contemporaneamente, costituire un riferimento per la stessa. Tale semi-incisione costituisce un indebolimento del materiale, già al limite della piegatura, e quindi è stato eliminato nella nuova versione della progettazione delle componenti di griglia (come si può vedere dai disegni riportati in Allegato 1). In Fig. 22 viene riportata la visione della cricca che si è aperta in corrispondenza di tale semi-incisione durante la piegatura. In Fig. 23, invece, viene riportata l'immagine di una nicchia ottenuta sempre con lo stesso materiale ma senza la semi-incisione di riferimento: la piegatura è integra ed il materiale, sebbene al limite, ha resistito.



**Figura 20. Particolare del taglio smussato e privo di bave anche nella parte non rettilinea, ottenuto mediante foto trancitura chimica (150X)**

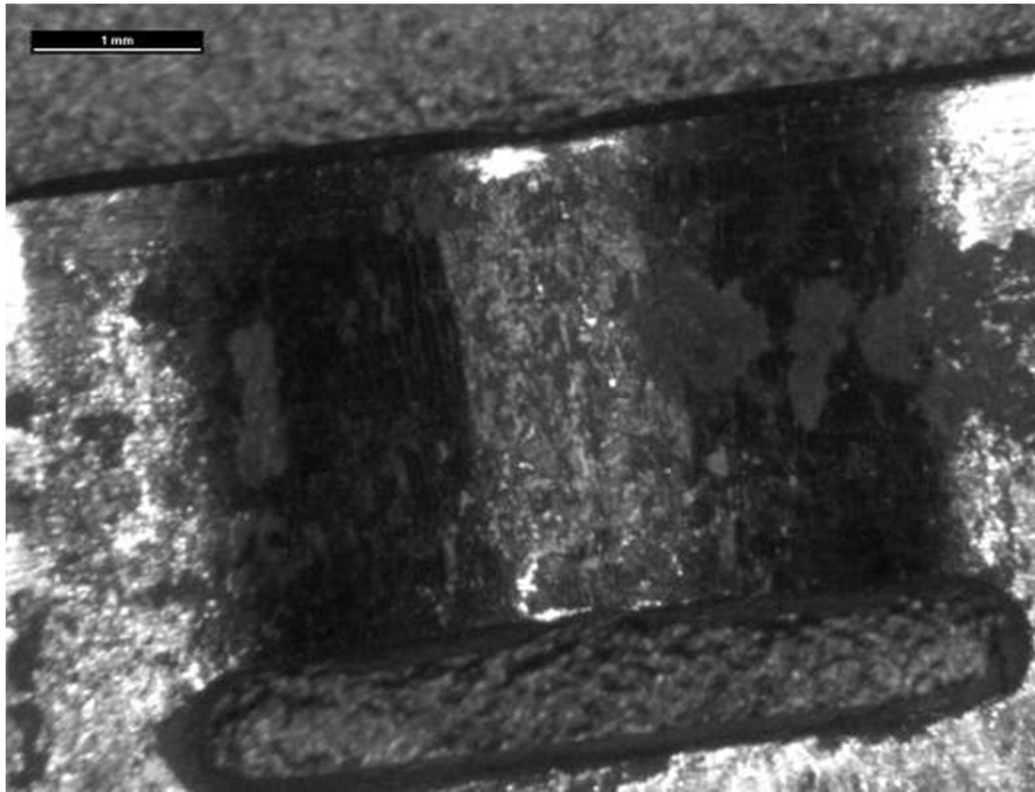


**Figura 21. Particolare del profilo ottenuto mediante foto tranciatura chimica e piegatura(50X): con semi-incisione per centraggio piegatura manuale (eliminata nella nuova progettazione)**



**Figura 22. Apertura della nicchia ottenuta per piegatura in corrispondenza della semi-incisione (50X)**





**Figura 23. Nicchia ottenuta per piegatura senza semi-incisione (50X)**

Dalle immagini riportate si può quindi ribadire che la foto tranciatura chimica è un processo molto interessante che potrà essere preso in considerazione per la realizzazione della nuova serie prototipale.

In alternativa a questa tecnica, a livello di produzione industriale, può essere presa in considerazione anche la tranciatura che però non garantisce la finitura della foto tranciatura chimica. La tranciatura può essere descritta come l'esecuzione di aperture o fori sagomati in una lamiera mediante un attrezzo detto punzone ed un contro-attrezzo detto matrice. La forza di tranciatura viene applicata alla lamiera dalla superficie frontale del punzone: sotto quest'azione la lamiera si piega leggermente tra punzone e matrice. Al crescere del carico sul punzone questo incide la lamiera. Mediante lo scorrimento del materiale del pezzo nella direzione di taglio e nella direzione a questa ortogonale, sul lato entrata del punzone lo spigolo di quest'ultimo penetra nel materiale mentre dalla parte opposta lo spigolo della matrice entra corrispondentemente nella lamiera. Si creano così due cricche che al crescere della corsa si congiungeranno causando la rottura completa della superficie di frattura. Generalmente si può assumere che la superficie di tranciatura è liscia per un terzo dello spessore e strappata per i due terzi. Le matrici, inoltre, hanno lo scarico di tranciatura che consente l'evacuazione del pezzo: di conseguenza si riscontrano differenze di dimensioni dovute alle successive affilature.

In Fig. 24 si può vedere lo schema della conformazione della sezione di taglio del pezzo tranciato [3].

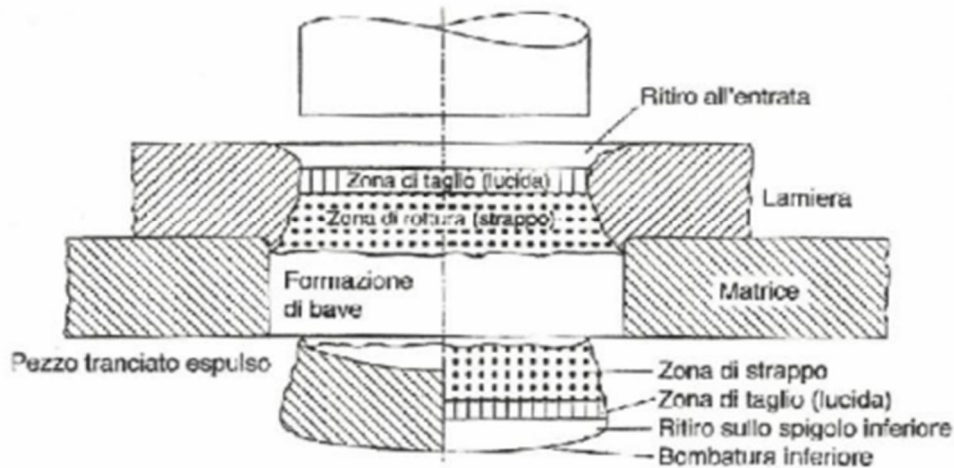


Figura 24. Conformazione della sezione di taglio del pezzo tranciato

Le forze che si generano nelle operazioni di tranciatura devono essere ricavate per il corretto dimensionamento della pressa necessaria e per la scelta degli utensili da impiegare. Una formula semplificata che fornisce il valore della forza di tranciatura  $F_{smax}$  è:

$$F_{smax} = s l_s k_s$$

dove  $s$  è lo spessore della lamiera,  $l_s$  è il perimetro di tranciatura e  $k_s$  la resistenza al taglio del materiale. Nella figura seguente è mostrata la scomposizione della forza di tranciatura orizzontale  $F_h$  in una verticale  $F_d$ .

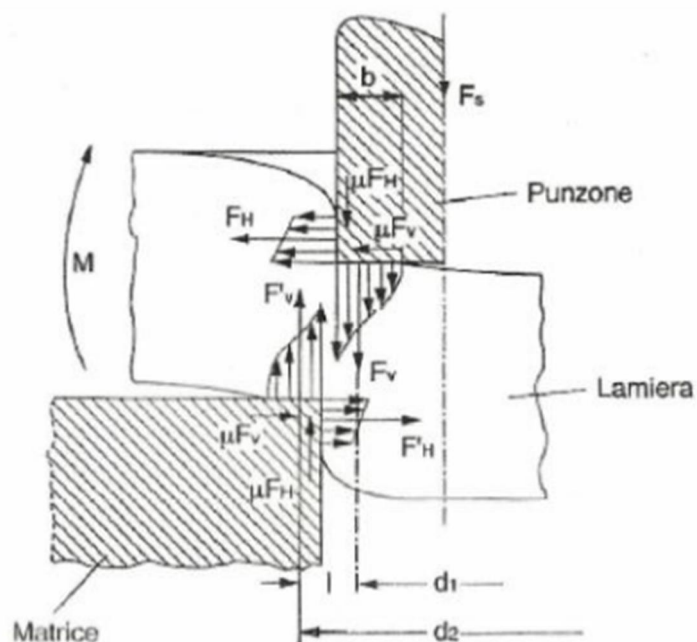


Figura 25. Componenti della forza di taglio nella tranciatura [3]

Particolari accorgimenti vanno presi nella progettazione e realizzazione delle attrezzature per tranciatura quando vanno processati acciai austenitici. Poiché la precisione dimensionale e geometrica dei pezzi tranciati è determinata dalla qualità degli attrezzi impiegati, questi ultimi devono essere di almeno due classi ISO di qualità superiore a quella richiesta per i pezzi finali. In generale, nella tranciatura di fori o finestre (tranciatura interna) si ottengono precisioni superiori rispetto alla tranciatura di profili che determinano un pezzo (tranciatura esterna). Nella tabella seguente sono riportati i valori delle tolleranze in mm per profili esterni, interni ed interassi.

**Tabella 1 – Tolleranze in mm nella tranciatura**

<b>Spessore lamiera (mm)</b>	<b>Fino a 10</b>	<b>Da 11 a 30</b>	<b>Da 31 a 50</b>	<b>Da 51 a 100</b>	<b>Da 101 a 200</b>
	<b>Tranciatura di profili interni</b>				
<b>Da 0.3 a 1.0</b>	0.05	0.07	0.08	0.12	-
<b>Da 1 a 3</b>	0.06	0.08	0.10	0.14	-
<b>Da 2 a 4</b>	0.08	0.10	0.12	0.15	-
	<b>Tranciatura di profili esterni</b>				
<b>Da 0.3 a 1.0</b>	0.10	0.14	0.16	0.20	0.25
<b>Da 1 a 3</b>	0.18	0.20	0.22	0.28	0.40
<b>Da 2 a 4</b>	0.24	0.26	0.28	0.34	0.60
	<b>Su interassi di finestre o fori</b>				
			<b>Fino a 50</b>	<b>Da 51 a 100</b>	<b>Da 101 a 200</b>
<b>Da 0.3 a 1.0</b>	-	-	± 0.1	± 0.15	± 0.20
<b>Da 1 a 3</b>	-	-	± 0.12	± 0.20	± 0.25
<b>Da 2 a 4</b>	-	-	± 0.15	± 0.25	± 0.30

In alternativa alla tranciatura tradizionale si era in un primo tempo anche pensato alla tranciatura fine che, però, anche interpellando esperti del settore pare sia più adatta a materiali di spessore oltre il mm, nei quali la parte “strappata” mediante la tranciatura tradizionale rappresenta una porzione consistente (circa il 70 %, su uno spessore di 5 mm). Nel caso in oggetto, trattandosi di lamine da 0.5 mm di spessore, il miglioramento apportabile sarebbe minimo; per contro occorrono stampi molto più complessi e onerosi in termini di costo e presse dedicate, di non facile reperimento.

## 2.4 Individuazione del materiale per la realizzazione dei prototipi

I materiali strutturali presi in considerazione in ambito nucleare per la realizzazione dei vari componenti impiegati nei Lead Fast Reactor (LFR) sono schematicamente rappresentati nel diagramma riportato in Fig. 26.

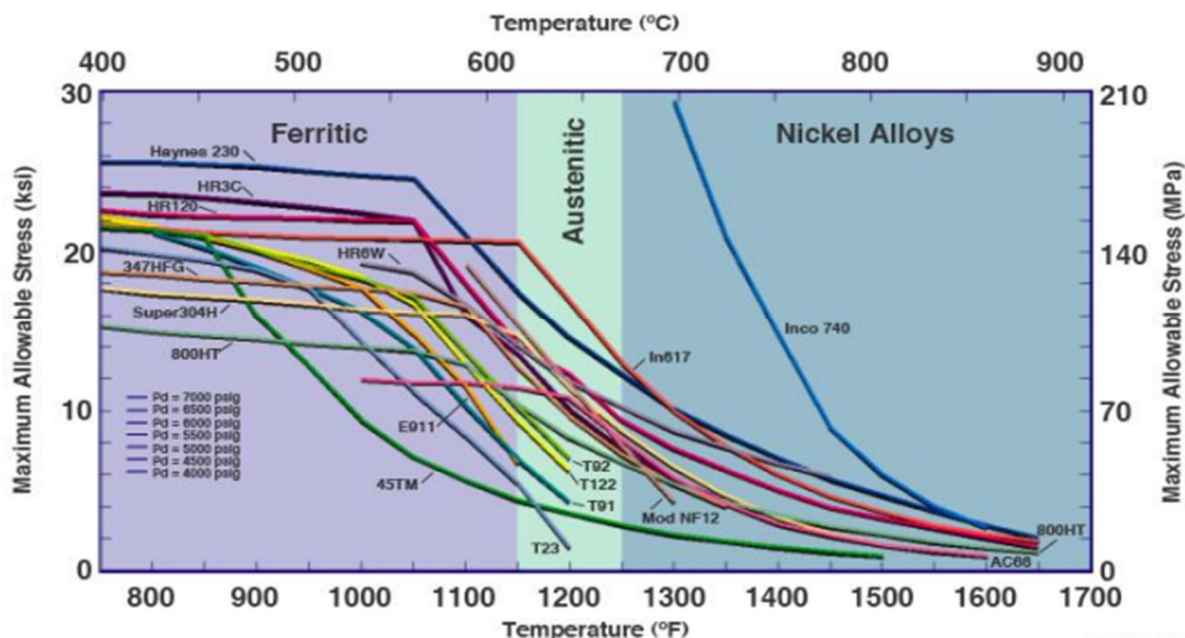


Figura 26. Materiali di grado nucleare impiegati nel settore specifico [4]

Materiali appartenenti al gruppo degli acciai austenitici rappresentano candidati interessanti per i rivestimenti delle barre di combustibile e per gli elementi di griglia. Le principali proprietà che determinano la scelta di un materiale sono la resistenza meccanica in condizioni particolarmente severe, il comportamento nei confronti delle radiazioni ionizzanti, la compatibilità con il refrigerante ed il comportamento allo swelling. Al fine di ottenere materiali sempre più idonei all'applicazione, sono state effettuate modifiche agli acciai inox austenitici della serie 300, aumentando la percentuale di Ni a scapito di quella di Cr e aggiungendo droganti come ad esempio il Ti. Si sono ottenuti i seguenti materiali che differiscono, principalmente, nella dose di incubazione necessaria per lo swelling (Fig. 27): 316 SS, 316 Ti, 15-15 Ti ed una versione modificata al Si dello stesso 15-15 Ti. Quando lo swelling è elevato (>10% diametrale) il materiale è più soggetto a frattura fragile alle temperature di esercizio.

Per svolgere le attività sperimentali circa la verifica di fattibilità della griglia, su indicazione di ENEA, è stato preso in considerazione l'AISI 316 Ti, avente caratteristiche simili al 15-15 Ti già verificato nella precedente annualità a percentuali estreme di incrudimento. La proprietà che il Ti conferisce a questo acciaio è quella di evitare la precipitazione dei carburi alle alte temperature (fra 450 e 800 °C) e quindi una maggiore resistenza alla corrosione a tali temperature.

Nelle prove di piegatura effettuate si è visto come la percentuale migliore di incrudimento che potesse costituire un buon compromesso fra la lavorabilità ed il comportamento nei confronti dello swelling fosse nel range 20-30%, operando trattamenti termici sulle lamine prima dell'ultima passata di incrudimento.

Sono quindi stati contattati alcuni produttori di acciaio (ad es. Acciaierie Valbruna, Cogne, Lasider, etc.) e rivenditori degli stessi al fine di poter acquisire la campionatura necessaria per poter

svolgere le prove sperimentali. Vi sono state molte difficoltà nell'ottenere una risposta positiva. Infatti, poiché i componenti della griglia sono oggetti molto piccoli (e questo è un punto non a favore), anche il quantitativo di materiale in gioco non giustifica la realizzazione di una partita ad hoc e, nella maggior parte dei casi, vi sono quantitativi minimi da acquisire di gran lunga superiori alla necessità sui quali, però, non si può chiedere caratteristiche particolari, ma si ottengono quelle da capitolato.

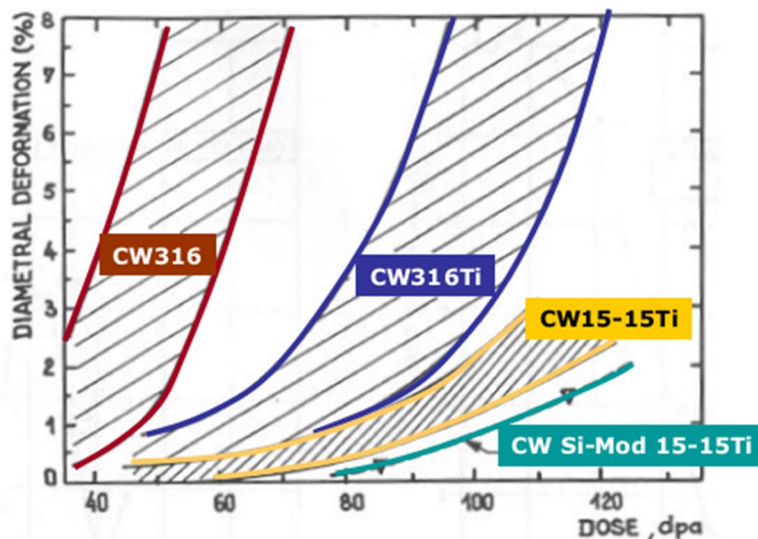


Figura 27. Materiali a confronto nei confronti dello swelling all'aumento della dose [4]

Si è quindi deciso di optare per l'acquisto dell'unico materiale commerciale disponibile (stato solubilizzato), considerando la verifica delle caratteristiche riportate nel capitolato in modo da correlare poi i parametri di processo alla qualità del materiale.

Si riportano le principali caratteristiche da capitolato a temperatura ambiente:

➤ composizione chimica:

C max	Cr	Ni	Mn max	P max	S max	Si max	Mo	Ti	Altri
0.08	16.5-18.5	10.5 – 13.5	2	0.045	0.015	1	2-2.5	5 x C min	0.7 max

- carico di snervamento:  $RP\ 0.2\ N/mm^2: \geq 200$
- carico di rottura:  $Rm\ N/mm^2: 500 - 700$
- allungamento:  $A5\% \geq 40$
- coeff. di strizione:  $Z\% \geq 50$
- Durezza:  $HB: \leq 215$

Il completamento delle attività sperimentali con questo materiale verrà esposto in successivi report.



## 2.5 Progettazione esecutiva del nuovo prototipo di griglia

Sulla base delle considerazioni e delle valutazioni ampiamente descritte nei paragrafi precedenti, si è proceduto alla stesura dei disegni che costituiscono la progettazione esecutiva delle componenti del nuovo prototipo di griglia.

In particolare, si è cercato di ridurre quanto più possibile le concentrazioni di sforzi anche con la rimozione di materiale per permettere piegature senza sforzi residui o aumentando i raggi di curvatura; si è prestata molta attenzione alle zone con angoli non retti e zone adiacenti piegate e non piegate e si è cercato di minimizzare le possibili corrugazioni e instabilità che si potevano manifestare per compressione durante le operazioni di piegatura, viste al microscopio sui provini precedentemente realizzati.

Poiché la prima tecnica di sagomatura individuata da FN per la realizzazione dei prototipi di griglia consiste nella foto tranciatura chimica, anche se è stata presa in considerazione, a livello di confronto, in seconda battuta, anche la tranciatura, i disegni esecutivi presentano sia lo sviluppo del profilo della componente di griglia sia la vista in piano già predisposta per la fotoincisione.

Viste le problematiche di indebolimento del materiale dovute alla realizzazione delle semi-incisioni realizzate in corrispondenza del culmine delle nicchie per favorirne la piegatura manuale, in questa versione tali semi-incisioni sono state eliminate, considerando di ottenere la piegatura in modo automatico in stampo.

Una griglia completa è costituita da 14 componenti, di cui due costituiscono le testate (1 e 14) ed hanno forma diversa dalle altre in quanto non vi è l'aggancio alla componente sottostante ma il confine con la parete del tubo esagonale, mentre le altre componenti cambiano di lunghezza ma hanno una forma che si ripete in modo modulare, terminazioni a parte che sono diverse in funzione della posizione nella scatola esagonale (da 2 a 6, di un tipo, da 7 a 13 di un altro).

In Allegato sono quindi riportati i disegni esecutivi di ciascuna componente, identificati con le sigle seguenti:

- J-50- 158 – part. 1
- J-50- 159 – part. 2
- J-50- 160 – part. 3
- J-50- 161 – part. 4
- J-50- 162 – part. 5
- J-50- 163 – part. 6
- J-50- 164 – part. 7
- J-50- 165 – part. 8
- J-50- 166 – part. 9
- J-50- 167 – part. 10
- J-50- 168 – part. 11
- J-50- 169 – part. 12
- J-50- 170 – part. 13
- J-50- 171 – part. 14

Tali disegni sono impiegati anche per la progettazione dei vari stampi occorrenti per la realizzazione delle nicchie e del profilo di piegatura. Infatti, per le piegature e le nicchie, essendo i componenti diversi occorrerà comunque realizzare più stampi come meglio descritto al paragrafo successivo.

## 2.6 Valutazioni sui cicli di lavoro e sulle attrezzature necessarie

I cicli di lavoro individuati da FN anche confrontandosi con ditte specializzate, in previsione di una produzione, sono essenzialmente due:

1. foto- tranciatura chimica + stampaggio in più stadi
2. tranciatura e stampaggio con utilizzo di stampi trancia e piega.

Nel primo caso la sequenza è la seguente:

- segnatura della posizione delle componenti di griglia su ciascuna lamina in funzione della lunghezza e dell'area occupata dai singoli componenti in modo da minimizzare gli scarti e avere una disposizione compatibile con i requisiti del taglio chimico; la possibilità di avere su un unico foglio più componenti riduce anche i costi di preparazione del negativo;
- tranciatura chimica di più componenti di griglia per lamina, con effettuazione di tagli (asole e linguette) e taglio dei bordi esterni (vale per tutte le componenti dalla 1 alla 14);
- deformazione mediante pressa attrezzata con stampo apposito per ottenere supporti fissi (nicchie): tale stampo potrà essere impiegato per tutte le nicchie che hanno passo costante (tranne per le componenti 1 e 14 che hanno una geometria diversa, per le quali occorre uno stampo apposito), facendo scorrere il nastro e andando a ripetere x volte la figura in funzione della lunghezza del componente;
- piegatura del lamierino, mediante stampi appositi, per ottenere l'andamento della componente di griglia che segue il posizionamento delle barrette secondo la geometria stabilita e gli agganci ed uncini; gli stampi saranno diversi a seconda del tipo di componente: uno stampo per 1 e 14, uno stampo per i componenti da 2 a 6 ed uno da 7 a 13: si effettuerà prima la piega delle parti terminali e poi la piega della parte centrale che dà l'andamento della componente della griglia.

In questo caso, quindi, la foto tranciatura chimica fornirebbe tutte le componenti nella loro versione piana; in funzione della dimensione della lastra da cui si parte si può anche considerare di avere un solo negativo complessivo per tutte le 14 componenti. Ciò riduce al massimo i costi e le tempistiche di lavorazione.

Per quanto riguarda le altre lavorazioni per ottenere pieghe e nicchie, occorrono diversi stampi:

- uno per nicchie componenti 1 e 14, uno per nicchie a passo costante componenti da 2 a 13
- uno stampo per le pieghe e gli uncini dei componenti 1 e 14, uno stampo per le pieghe e gli uncini dei componenti da 2 a 6 ed uno per le pieghe e gli uncini dei componenti da 7 a 13.

In totale si parla di almeno cinque stampi diversi.

Nel secondo caso la sequenza è la seguente:

- taglio della lamiera in dimensioni compatibili con lo scorrimento sotto la pressa;
- tranciatura/deformazione per ottenere nicchie componenti 1 e 14 con apposito stampo con passo manuale; semitranciatura di un lato, semitranciatura del lato opposto e deformazione in forma per ottenere le nicchie;
- tranciatura/deformazione di tutti i componenti da 2 a 13 nelle parti centrali modulari con stampo apposito (lo stampo sarà lo stesso che eseguirà un numero di x passi in funzione della lunghezza della componente)
- tranciatura dei finali dei componenti da 2 a 6 e da 7 a 13 (due stampi diversi)



- piegatura e ottenimento uncini componenti 1 e 14 (stampo apposito)
- piegatura e ottenimento uncini componenti da 2 a 6 (uno stampo) e da 7 a 13 (uno stampo) realizzando prima le pieghe delle alette alle estremità e poi la piega dell'andamento complessivo.

In questo caso si ha quindi la necessità di realizzare sette stampi diversi, considerando anche la problematica da verificare in campo circa la necessità di lavorazioni di ripresa e di finitura per eliminare eventuali bave dovute alla tranciatura.

Ovviamente in entrambi i casi, al fine di verificare la rispondenza delle pieghe e dei profili ottenuti con il disegno, è necessario provvedere alla realizzazione di appositi calibri e tamponi, da impiegare per velocizzare il controllo in ogni singola fase di processo, nonché verificare gli andamenti anche con un proiettore di profili, viste le dimensioni molto piccole e le numerose variabili in gioco.

Mentre il primo ciclo di lavoro è già stato sperimentato in parte lo scorso anno e si è vista l'ottima finitura dei componenti ottenuti, il secondo è ancora in fase di test. I risultati delle prove saranno esposti in successivi report.

## *2.7 Valutazione circa la trasferibilità su scala industriale*

Sia nell'ottica di valutare soluzioni tecnologiche innovative ma anche economicamente sostenibili e in grado di garantire la ripetibilità del processo di realizzazione, la costanza delle caratteristiche dei componenti realizzati e la loro rispondenza alle specifiche, sia con lo scopo di realizzare attrezzature idonee alle prove di fattibilità che potessero avere una loro scalabilità anche a livello industriale, è stata effettuata una ricerca di mercato.

Sono state ricercate ditte specializzate nella foto tranciatura chimica e nelle altre tecniche individuate (tranciatura, piegatura e stampaggio industriale di lamiere in inox) che fossero idonee sia dal punto di vista della capacità tecnica sia dal punto di vista della qualifica ad operare in un contesto di garanzia di qualità di livello nucleare. Anche quest'ultimo aspetto, infatti, non va trascurato in quanto la predisposizione ad operare secondo un certo *modus operandi* rende anche la sperimentazione più proficua e permette di cogliere sfumature che altrimenti potrebbero essere perse e quindi anche portare a soluzioni fuorvianti. La capacità di seguire l'oggetto da realizzare dalla verifica delle caratteristiche del materiale base alla registrazione di tutti i passi e delle variabili di processo, consentendo di avere la tracciabilità dell'intero processo, rappresenta un fattore non trascurabile.

Fra i vari interlocutori esaminati, sono state individuate due ditte che possiedono i requisiti necessari per supportare FN nella parte di sperimentazione e, eventualmente, di poter seguire anche una possibile produzione in serie.

Si tratta di:

- Benedetti Srl – Progetto Subfornitura, specializzata nella foto tranciatura chimica
- EMMESTAMPI Srl , specializzata in lavorazioni di precisione e nella costruzione di stampi per trancia/piega.



### 3 Conclusioni

A conclusione di questo rapporto redatto al termine delle attività svolte da FN nell'ambito dell'Accordo di collaborazione con ENEA, relativamente a "Prove di fabbricabilità per lo sviluppo di griglia per elemento di combustibile LFR", si può affermare che:

- è stata effettuata una revisione della configurazione di griglia spaziatrice sviluppata nella precedente annualità. Sulla base di scambi di valutazioni tecniche avvenute durante riunioni del "Tavolo Pesante", cui anche FN ha partecipato, nonché in riunioni specificamente dedicate, sono emerse riflessioni circa alcuni aspetti della tipologia di griglia proposta da FN nella precedente annualità a confronto con l'idea di input Ansaldo/ENEA. Mentre la griglia proposta da FN risultava più compatibile con problematiche realizzative, alcuni aspetti legati alla fluidodinamica indicavano come l'idea di input potesse essere inizialmente più idonea, sebbene la tipologia di griglia fosse meno resistente dal punto di vista meccanico e più onerosa come realizzazione e assemblaggio (anche e soprattutto in vista di una produzione di serie). Si è resa quindi necessaria una verifica a livello di calcoli preliminari dal punto di vista meccanico e fluidodinamico. Tale verifica ha portato alla definizione di una configurazione a singolo uncino, avente gli appoggi fissi costituiti da un contatto puntiforme e dalla larghezza di ciascuna striscia aumentata di 10 mm rispetto alla precedente in modo da rendere le singole componenti più resistenti.
- Sono stati realizzati i disegni esecutivi delle componenti di griglia nella nuova configurazione, sulla base dei quali poter procedere alla realizzazione degli stampi appositi.
- È stata effettuata una valutazione del verso delle fibre del materiale rispetto alla direzione di piega; la direzione di laminazione risulta per la piega un fattore piuttosto influente, in quanto la piega effettuata parallelamente alla direzione di laminazione risulta la meno favorevole e può dare luogo a cricche. In questo caso occorre aumentare il raggio di piegatura. Sono state effettuate analisi di microscopia su provini ottenuti in test di piegatura.
- Sono stati valutati i limiti tecnologici delle tecniche prese in considerazione.
- È stata eseguita una prima valutazione delle problematiche di assemblaggio del fascio all'interno della scatola esagonale, giungendo alla modifica della parte terminale delle componenti di griglia allungando la linguetta che deve flettere nel momento dell'introduzione e poi rilasciarsi nel punto in cui trova la sua sede, agganciandosi così alla scatola esagonale.
- Sono stati individuati i fornitori dell'acciaio necessario per la realizzazione dei prototipi.
- Sono state valutate le tecniche ed i cicli di lavoro per giungere al componente finito, prendendo in considerazione due modalità: foto tranciatura chimica + stampaggio in più stadi, tranciatura e stampaggio attraverso lo stesso stampo di trancia e piega. Ovviamente, dato che le componenti di griglia sono tutte diverse per quanto riguarda le terminazioni, mentre la parte centrale si ripete modularmente, sono stati considerati stampi diversi con i quali poter realizzare poi in serie la griglia completa. Sono stati anche considerati calibri e tamponi appositi per effettuare la verifica delle angolazioni e dei raggi di curvatura.
- Sono state effettuate analisi su materiali processati per foto tranciatura per testimoniare la finitura dei tagli esenti da bave.
- E' stata effettuata una ricerca di mercato per individuare ditte specializzate nella foto tranciatura chimica e nelle altre tecniche individuate (piegatura e stampaggio industriale), idonee dal punto di vista della capacità tecnica sia dal punto di vista della qualifica ad



operare in un contesto di garanzia di qualità di livello nucleare. L'individuazione di tali ditte si colloca nell'ottica della verifica dell'industrializzazione del processo per la realizzazione della griglia in funzione dei limiti tecnologici individuati e delle caratteristiche di specifica della griglia derivanti dalla progettazione supportata dagli studi di fluidodinamica.

#### 4 Riferimenti bibliografici

1. G. Di Caprio, "Lavorazione per deformazione plastica a freddo dei nastri e delle lamiere sottili di acciaio inossidabile", Rivista meccanica, n. 568/II (1974), pp. 409-419.
2. A. Frezza, "Indagini chimiche e strutturali su componenti in acciaio", tesi di laurea, a.a. 2010-2011, Università degli studi di Padova
3. M. Premoli, "Studio numerico e sperimentale di limiti tecnologici di un'operazione di tranciatura fine", tesi di laurea, a.a. 2011-2012, Politecnico di Milano
4. M. Servano, "Overview on clad and structure materials for fast reactor systems", Heraeus Seminar, 5-8 dec. 2011 Bad Honnef (D)

**Balustro Maurizio**

Il Signor Balustro ha conseguito il titolo di studio di Perito in elettronica industriale e lavora presso FN spa dal 2001 in qualità di tecnico specializzato di impianti ed elettricista PES.

All'interno dello specifico Contratto ENEA-FN ha svolto attività di supporto operativo allo sviluppo processi e manutenzioni elettriche.

**Cuccuru Gian Luca**

Il Signor Cuccuru ha conseguito il titolo di studio di Perito elettromeccanico ad indirizzo navale ed è assunto presso FN spa dal 2002 nell'ambito dell'officina per lavorazioni meccaniche con utensili specifici.

All'interno dello specifico Contratto ENEA-FN ha svolto attività di supporto alla progettazione meccanica.

**Fassina Sara**

La Dottoressa Fassina si è laureata in Scienze Naturali presso l'Università degli Studi di Torino ed è dipendente di FN SpA dal 2011 in qualità di Ricercatore-Tecnologo nell'ambito analisi chimico-fisiche di caratterizzazione dei materiali.

All'interno dello specifico Contratto ENEA-FN ha svolto attività di analisi di laboratorio.

**Ghisolfi Enrica**

La Dottoressa Ghisolfi ha conseguito la Laurea in Fisica presso l'Università degli Studi di Pavia nel 1992 e lavora per la FN spa dal 1993. Attualmente ricopre la posizione di Ricercatore Senior in qualità di Responsabile del coordinamento delle attività scientifiche di FN.

All'interno dello specifico Contratto ENEA-FN ha svolto le attività di responsabile scientifico del contratto con ENEA e delle attività di ricerca.

**Pappadà Antonio**

Il Signor Pappadà è assunto presso la FN spa dal 2007 in qualità di Tecnico di Processo.

All'interno dello specifico Contratto ENEA-FN ha svolto attività di supporto operativo alla progettazione meccanica.

**Pin Francesca Romana**

La Dottoressa Pin è laureata in Chimica presso l'Università degli Studi di Genova e possiede un Master in Gestione di Impresa, assunta presso FN spa dal 2002 occupa oggi la posizione di Ricercatore Senior oltre ad essere un Tecnico di laboratorio chimico-fisico.

All'interno dello specifico Contratto ENEA-FN ha svolto attività di indagine bibliografica e di mercato circa l'industrializzazione del prodotto oggetto della ricerca.

**Porotto Germano**

Il Signor Porotto ha conseguito il titolo di Attrezzista Meccanico presso l'Istituto Professionale INAPLI di Novi Ligure (AL) ed è dipendente della FN spa dal 1978 come Operatore di Produzione nel campo nucleare. Attualmente ricopre il ruolo di Responsabile del Settore Manutenzione.

All'interno dello specifico Contratto ENEA-FN ha svolto attività sperimentali legate a lavorazioni meccaniche correlate alla progettazione.

**Timo Maurizio**

Il Signor Timo ha conseguito il Diploma di Maturità di Liceo Artistico ed è assunto presso FN spa dal 2006 come Tecnico addetto al supporto della ricerca e alle lavorazioni meccaniche e idrauliche.

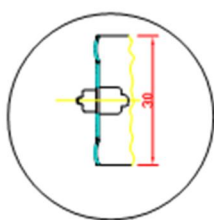
All'interno dello specifico Contratto ENEA-FN ha svolto attività di progettazione meccanica.



## **ALLEGATI**

- Disegno n. J-50 -0158 – part. 1**
- Disegno n. J-50 -0159 – part. 2**
- Disegno n. J-50 -0160 – part. 3**
- Disegno n. J-50 -0161 – part. 4**
- Disegno n. J-50 -0162 – part. 5**
- Disegno n. J-50 -0163 – part. 6**
- Disegno n. J-50 -0165 – part. 8**
- Disegno n. J-50 -0166 – part. 9**
- Disegno n. J-50 -0167 – part. 10**
- Disegno n. J-50 -0168 – part. 11**
- Disegno n. J-50 -0169– part. 12**
- Disegno n. J-50 -0170 – part. 13**
- Disegno n. J-50 -0171 – part. 14**

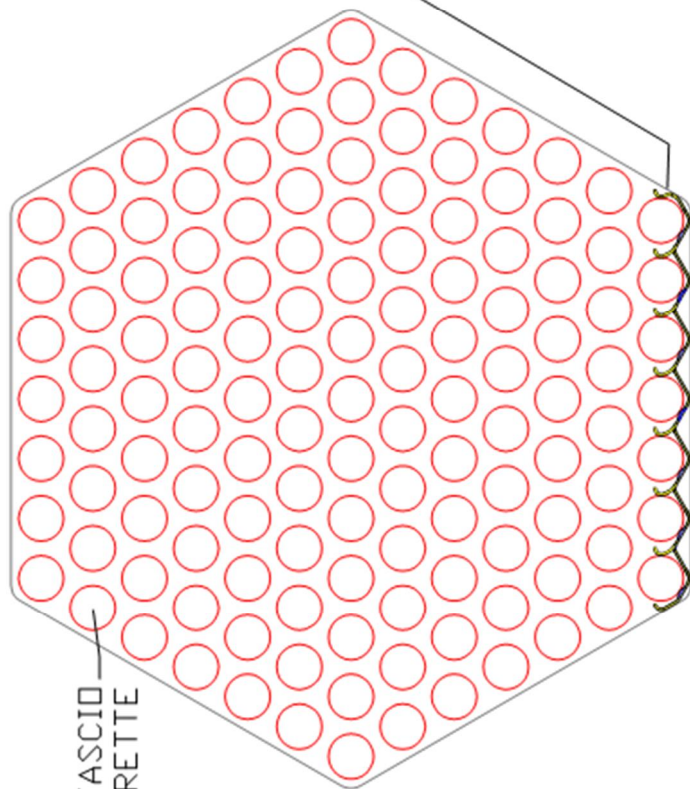
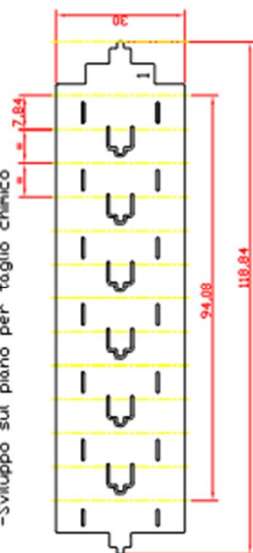
-Componente 1 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



Sez A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi



-Sviluppo sul piano per taglio chimico



FASCIO  
BARRETTE

POSIZIONE COMPONENTE 1  
o.l. MONTAGGIO GRIGLIA

SCALA 1 : 1

POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIEÙ
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				02-09-2014
REVISIONE		MODIFICAZIONE		APPROV. AUTORE	DATA
				Comune/Carico di ruolo	
				Classe Inps	
				Classe Inps	
				FORMAIO	n° J-50-0158
				SCALA	PART.
				RE Imp	SOSTITUTO DA
				...../...../.....	SOSTITUIRE

Enel Merce  
Alessandria  
Italy

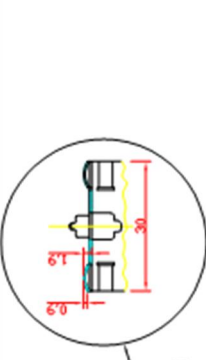
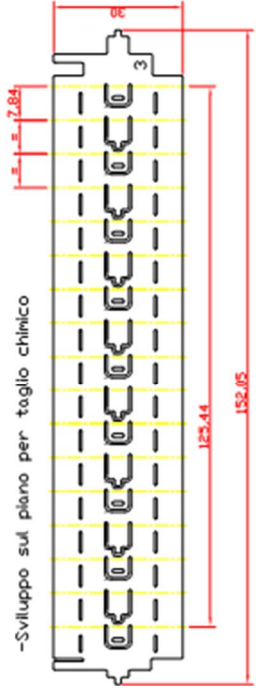
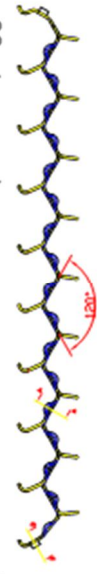
FN S.p.A.  
MSE-ENERGIE  
E SERVIZI

Titolo - MSE-ENEA PAR 2013  
- LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE  
- Componente n°1

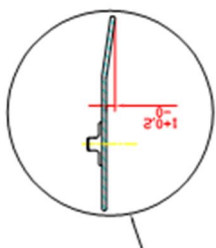
PRODOTTO IN ITALIA  
\* Distribuzione e vendita in Italia e all'estero \*



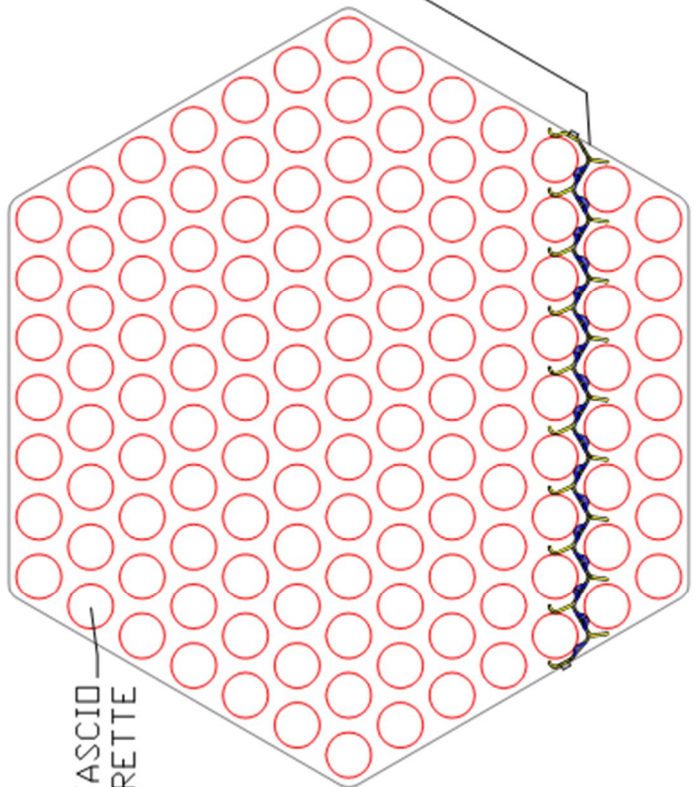
-Componente 3 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



Sez A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi



Sez B-B  
Particolare profilo di piegatura  
finale per aggancio griglia in  
posizione all'interno  
dell'esagono (Scala 2:1)



FASCIO  
BARRETTE

POSIZIONE COMPONENTE 3  
al MONTAGGIO GRIGLIA

SCALA 1 : 1

POS	DESCRIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIEÙ
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				10-09-2014
	PRELIMINARE				

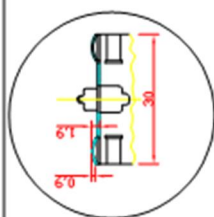
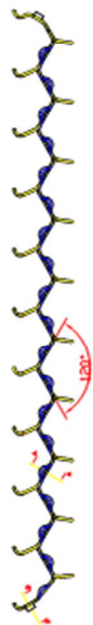
DESCRIZIONE	DISE.	APPROV.	AUTORE	DATA

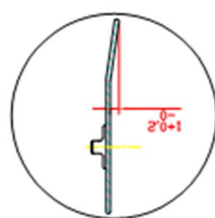
		<b>RovolMergo</b> Alessandria Italy	
Titolo: - MSE-ENEA PAR 2013 - LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE - Componente n°3		FORMATO A/ SCALA PART. n° J-50-0160 SOSTITUTO DA SOSTITUIRE	



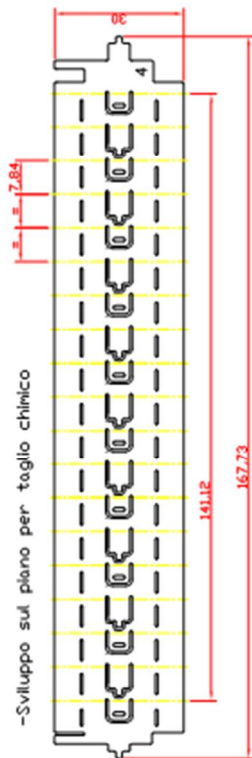
-Componente 4 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



Sez A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi

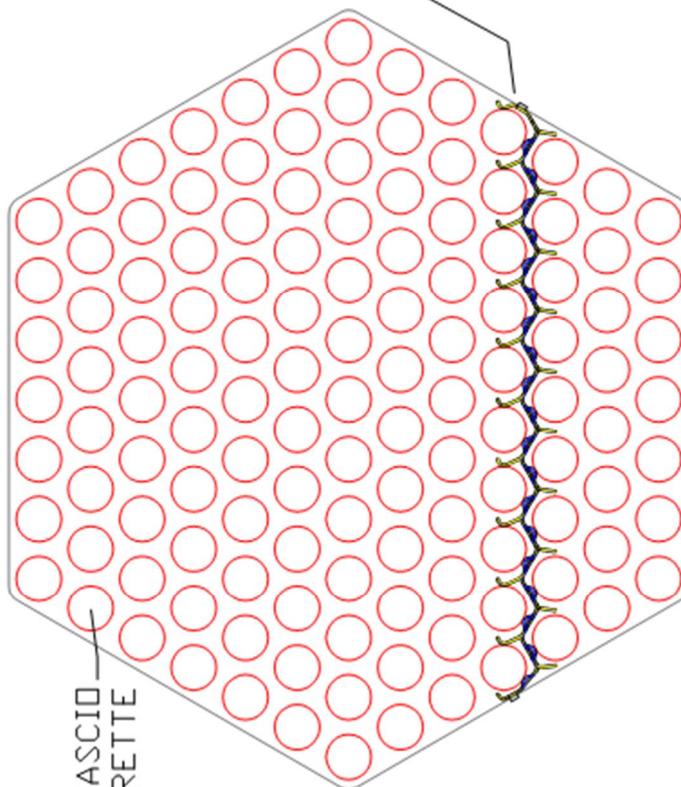


Sez B-B  
Particolare profilo di piegatura  
finale per aggancio griglia in  
posizione all'interno  
dell'esagono (Scala 2:1)



-Sviluppo sul piano per taglio chimico

POSIZIONE COMPONENTE 4  
al MONTAGGIO GRIGLIA

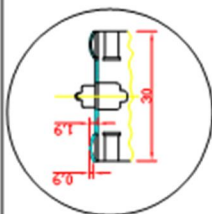
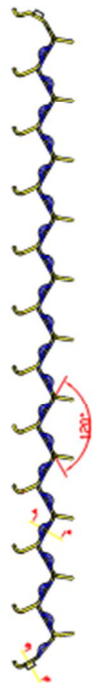


SCALA 1 : 1

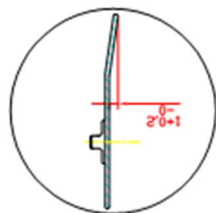
POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIE' SO
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				102-49-2014
REVISIONE		MODIFICAZIONE		DES.	APPROV. AUTORE DATA
		 <b>F.N. S.p.A.</b> <b>FOSSE S. PIETRO</b> <b>S. VINCENZO JUVENIA</b>		Comune/Veneto di sede Classe Imp. Classe Imp.	
		<b>RovoloMerigo</b> <b>Alessandria</b> <b>Italy</b>		n° J-50-0161 PART.	
		Titolo: - MSE-ENEA PAR 2013 - LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE - Componente n°4		FORMATO A/ SCALA RE Imp SOSTITUTO DA SOSTITUIRE	



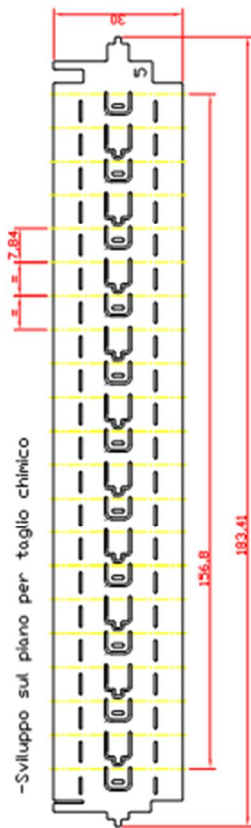
-Componente 5 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



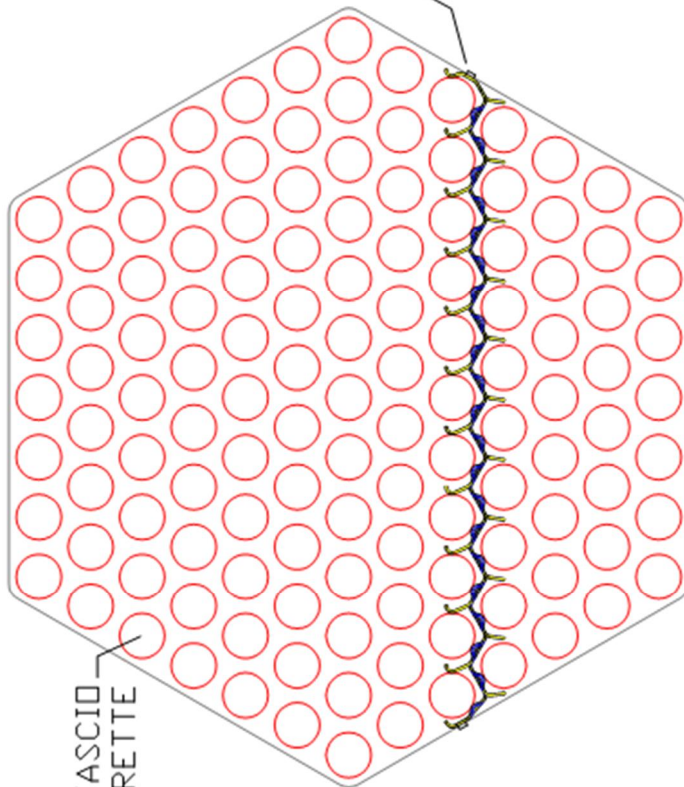
Sez A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi



Sez B-B  
Particolare profilo di piegatura  
finale per aggancio griglia in  
posizione all'interno  
dell'esagono (Scala 2:1)



POSIZIONE COMPONENTE 5  
sulla MONTAGGIO GRIGLIA



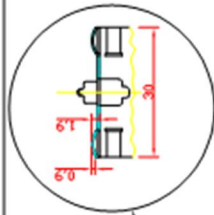
FASCIO  
BARRETTE

SCALA 1 : 1

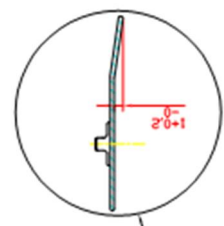
POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIEÙ
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				102-49-2014
REVISIONE					
MODIFICAZIONE					
DESCRIZIONE					
 <b>FN s.p.a.</b> <b>INDUSTRIE FONDARIE</b> <b>ITALIA</b>		<b>RovoloMeravigli</b> <b>Allesandria</b> <b>Italy</b>		Commessa/Versione di serie Classe prod. Classe materiale	
Titolo: - MSE-ENEA PAR 2013 - LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE - Componente n°5		FORMA A/		n° J-50-0162	
		SCALA		PART.	
		RE (dag)		SOSTITUITO DA	
		(mm)		SOSTITUIRE	



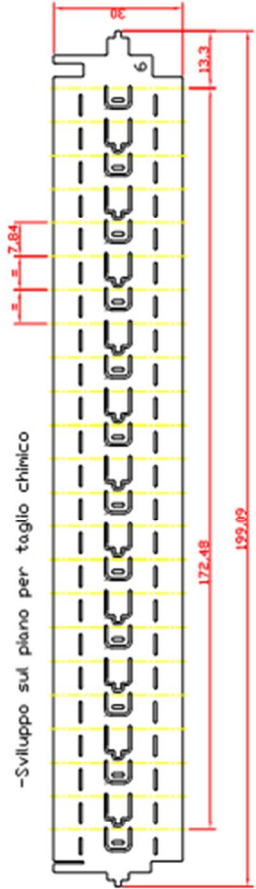
-Componente 6 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



Sez A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi

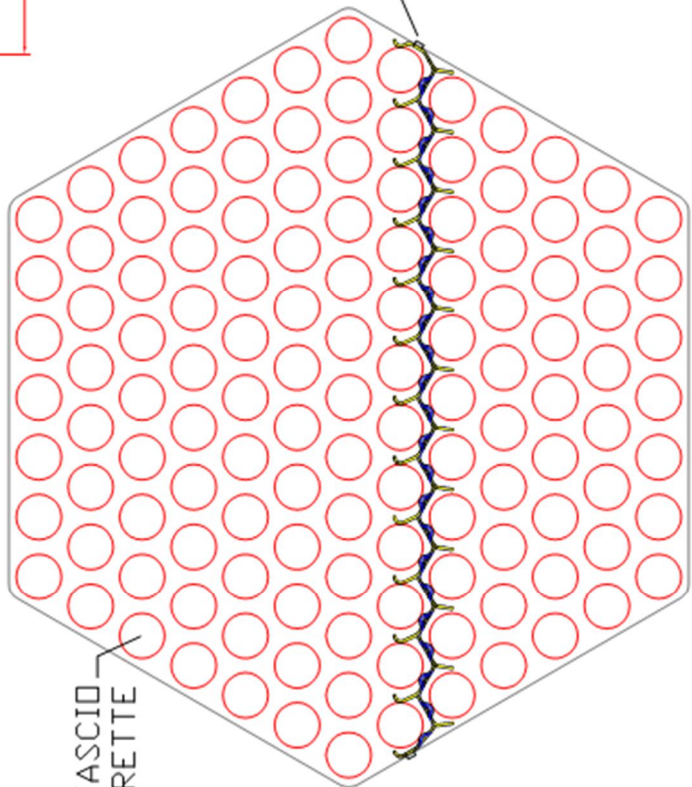


Sez B-B  
Particolare profilo di piegatura  
finale per aggancio griglia in  
posizione all'interno  
dell'esagono (Scala 2:1)



-Sviluppo sul piano per taglio chimico

POSIZIONE COMPONENTE 6  
sulla MONTAGGIO GRIGLIA

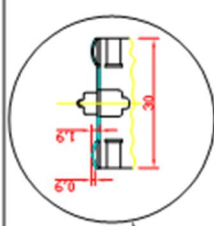


FASCIO  
BARRETTE

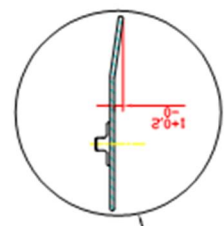
SCALA 1 : 1

POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIERO
7					kg
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				02-09-2014
PRELIMINARE					
MODIFICHE					
DES.					
APPROV.					
AUTORE					
DATA					
Comune/Versione di stato					
Classe prod.					
Classe mat.					
FORMATO					
A/					
SCALA					
PART.					
n° J-50-0163					
RE Desc					
SOSTITUTO DA					
SOSTITUIRE					
Titolo - MSE-ENEA PAR 2013 - LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE - Componente n°6					

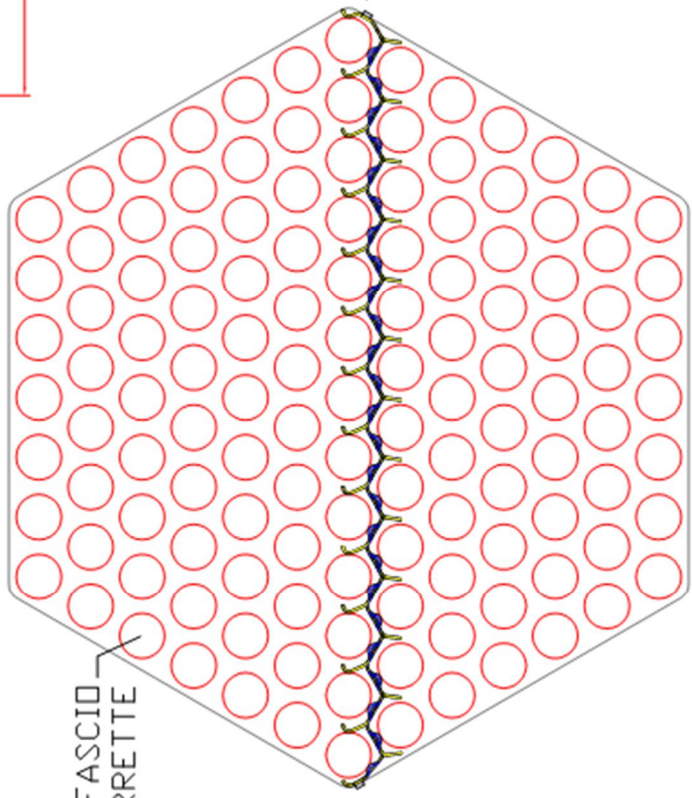
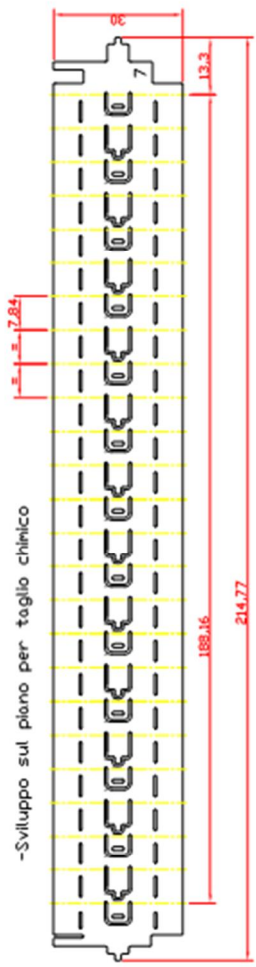
-Componente 7 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



Sez A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi



Sez B-B  
Particolare profilo di piegatura  
finale per aggancio griglia in  
posizione all'interno  
dell'esagono (Scala 2:1)



FASCIO  
BARRETTE

POSIZIONE COMPONENTE 7  
o.l. MONTAGGIO GRIGLIA

SCALA 1:1

POS.	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIEDO
7					kg
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				02-09-2014
0	PRELIMINARE				

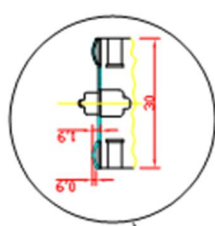
Denominazione: <b>RovoloMergo Alessandria Italy</b>		Disegnato: _____ Verificato: _____ Data: _____
Cliente: _____ Data: _____		Approvato: _____ Data: _____
Formato: <b>A/</b>		n° <b>J-50-0164</b>
Scala: _____		Part.: _____
Ref. Imp.: _____		Sostituito da: _____
Ref. Proj.: _____		Sostituito da: _____

Titolo: <b>MSE-ENEA PAR 2013</b> <b>LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE</b> - Componente n°7	
--	--

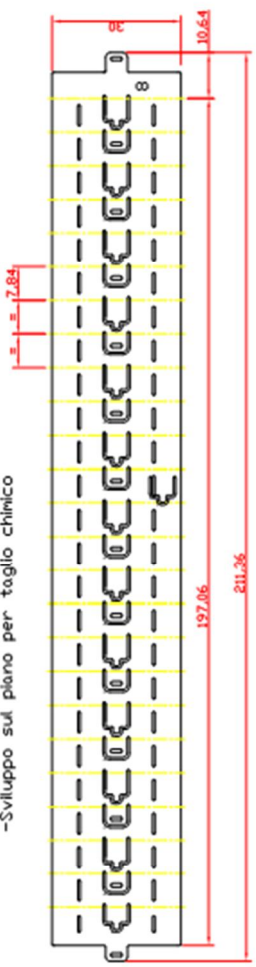


-Componente 8 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura

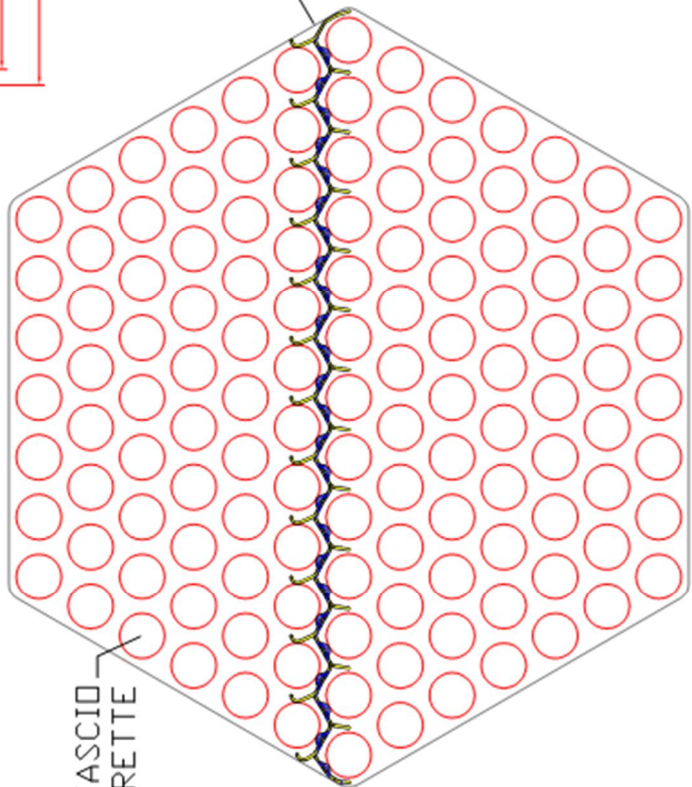


SEZ A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi

-Sviluppo sul piano per taglio chimico



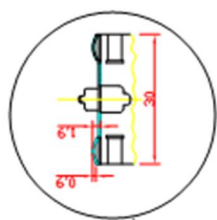
POSIZIONE COMPONENTE 8  
sull' MONTAGGIO GRIGLIA



SCALA 1:1

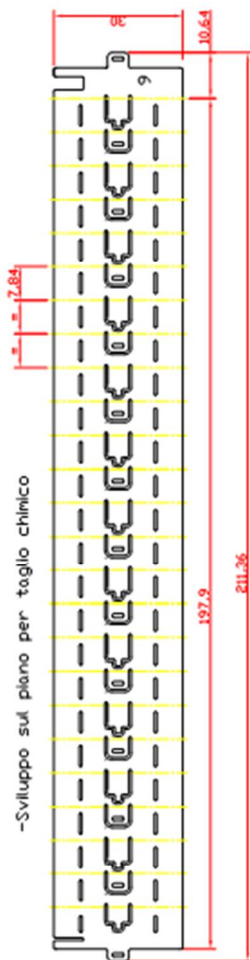
POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIE' SO
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				02-09-2014
REVISIONE		MODIFICAZIONE		DES.	APPROV. AUTORE DATA
				Gruppo/Ente di sede Cliente Int. Cliente Est.	
		Formato A/		n° J-50-0165	
		Tema: - MSE-ENEA PAR 2013 - LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE - Componente n°8		PART. SOSTITUTO DA SOSTITUIRE	

-Componente 9 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



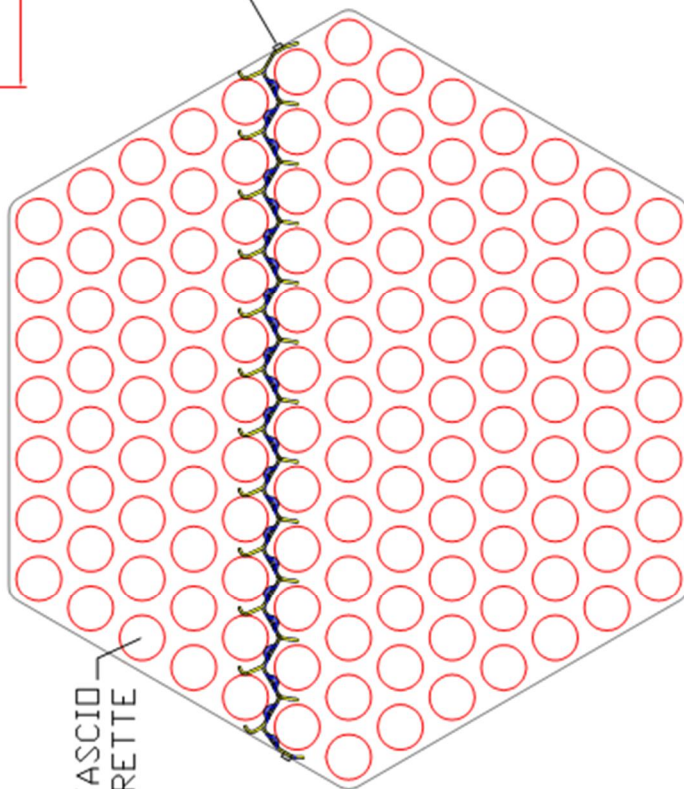
SEZ A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi

-Sviluppo sul piano per taglio chimico



SCALA 1 : 1

POSIZIONE COMPONENTE 9  
sulla MONTAGGIO GRIGLIA



POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIE' SO
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				02-09-2014
REVISIONE					
DESCRIZIONE					
MODIFICHE					
DISEGNO					
AUTORE					
DATA					
Comune/Carico di sede					
Cassa Imp.					
Cassa Imp.					
FORMA					
A/					
SCALA					
PART.					
n° J-50-0166					
SOSTITUTO DA					
SOSTITUIRE					

Enel Meravigli  
Alessandria  
Italy

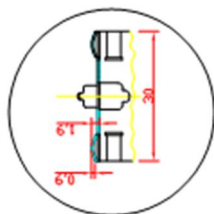
FN S.p.A.  
NUOVE TECNOLOGIE  
E SERVIZI AVANZATI

Titolo - MSE-ENEA PAR 2013  
- LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE  
- Componente n°9

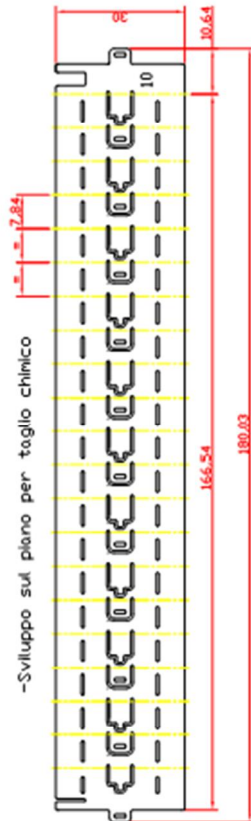
PRODOTTO IN ITALIA  
\* Distribuzione e vendita in Italia e all'estero \*



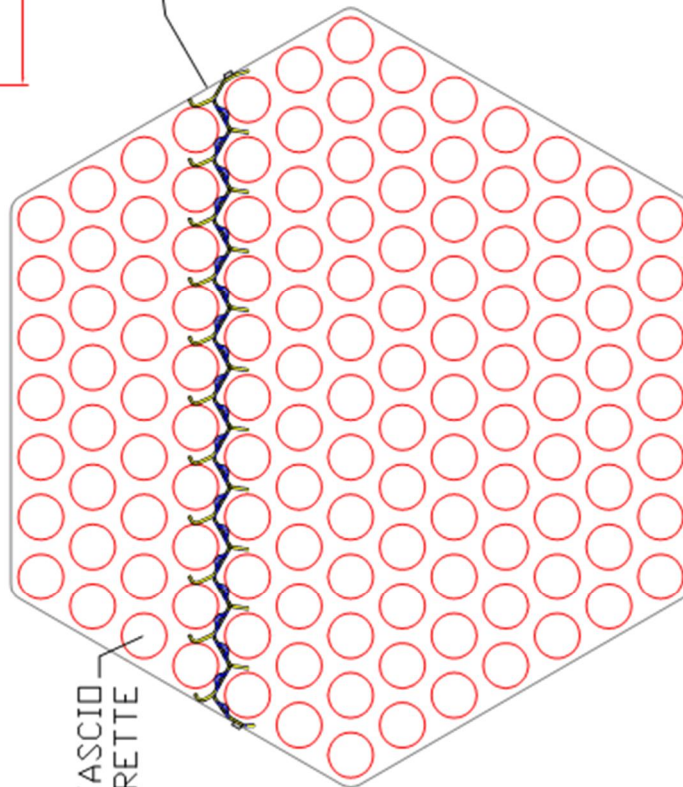
-Componente 10 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



Sez A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi



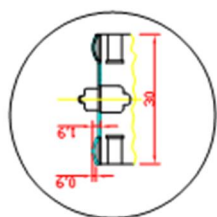
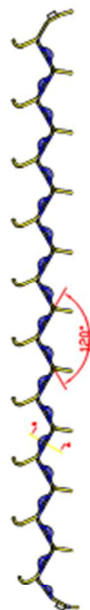
POSIZIONE COMPONENTE 10  
al MONTAGGIO GRIGLIA



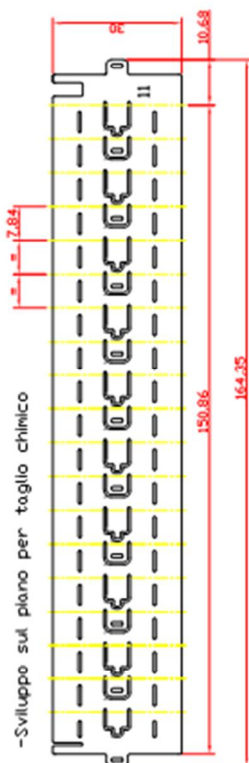
SCALA 1 : 1

POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIE' SO	PIE' SO
7						
6						
5						
4						
3						
2						
1						
0	EMESSO					
PRELIMINARE						
DESCRIZIONE		MODIFICHE		DEL.	APPROV.	AUTORE
				Commessa/Versione di stato Cliente Int. Cliente Est.		
Titolo: - MSE-ENEA PAR 2013 - LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE - Componente n°10		FORMA A/		n° J-50-0167		
		SCALA		PART.		
		RE Imp		SOSTITUITO DA		
		...../Pkg		SOSTITUIRE		

-Componente 11 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



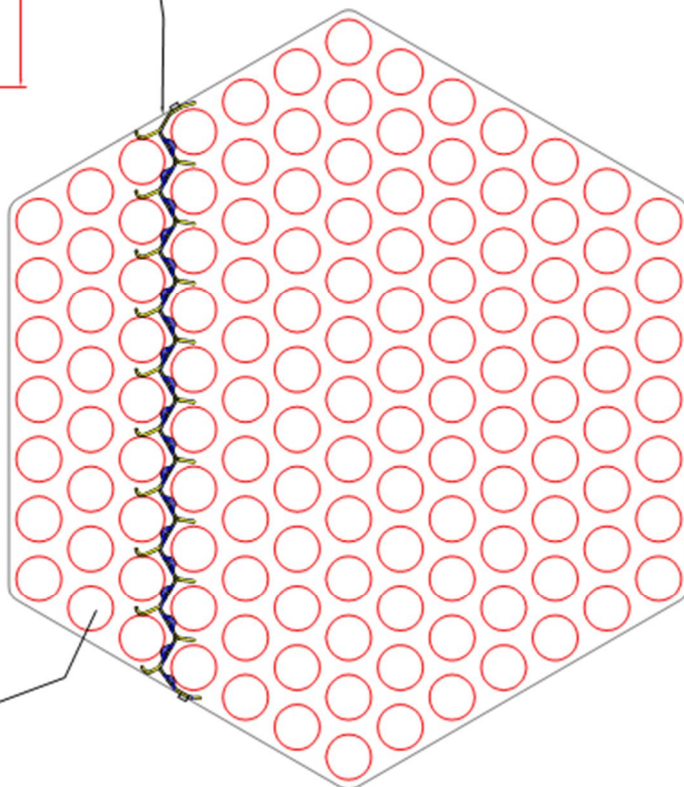
Sez A-A  
Particolare sezione  
punti di appoggio fissi



-Sviluppo sul piano per taglio chimico

POSIZIONE COMPONENTE 11  
sulla MONTAGGIO GRIGLIA

FASCIO  
BARRETTE



SCALA 1 : 1

POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIE' SO
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				02-09-2014
REVISIONE		MODIFICAZIONE		DES.	APP/PROV. AUT/DIR. DATA.
				Comune/Verbo di sede	
				Cassa Imp.	
				Cassa Imp.	
				FORMA	n° J-50-0168
				SCALA	PART.
				RE Imp.	SOSTITUTO DA
					SOSTITUIRE

Enel Meraviglio  
Alessandria  
Italy

FN S.p.A.  
NUOVE ENERGIE  
E SERVIZI INTEGRATI

Titolo - MSE-ENEA PAR 2013  
- LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE  
- Componente n°11

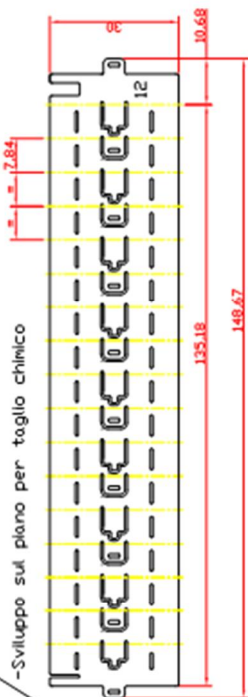
NOTA: BARRETTA 110 (SOSTITUIRE) 100 (SOSTITUIRE) 120 (SOSTITUIRE)  
\* Sostituito anche SOSTITUIRE J 100 e 120



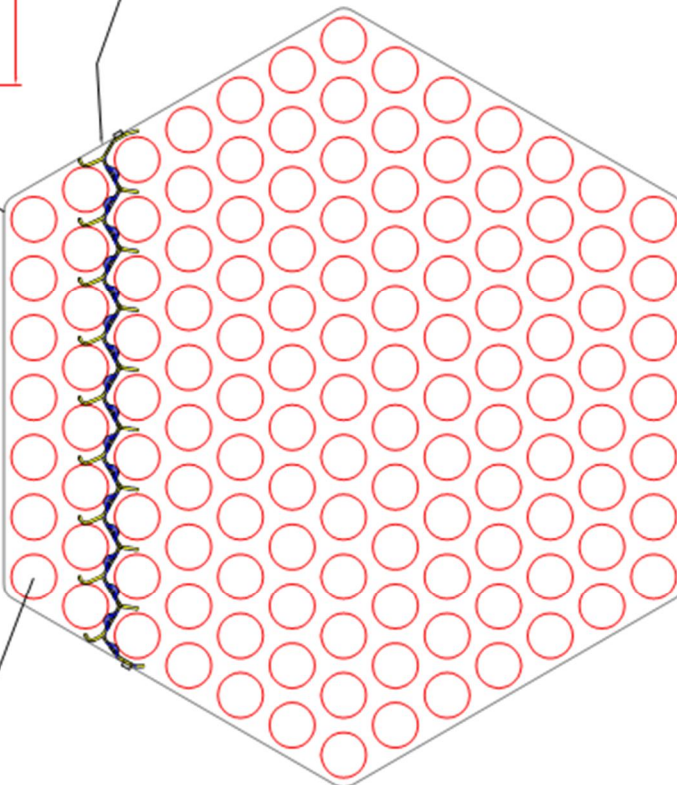
-Componente 12 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



-Sviluppo sul piano per taglio chimico



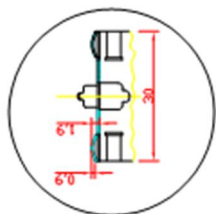
POSIZIONE COMPONENTE 12  
sulla GRIGLIA



FASCIO  
BARRETTE

Sez. A-A

Particolare sezione  
punti di appoggio fissi



SCALA 1:1

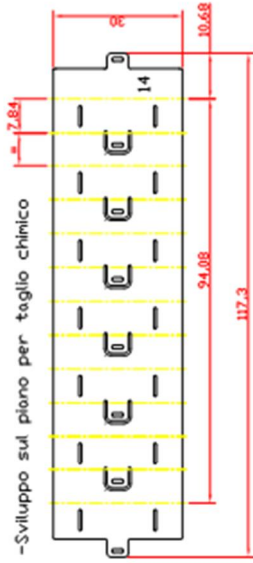
POS.	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PIEDO
7					kg
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				102-49-2014
REVISIONE		MODIFICAZIONE		DES.	APPROV. AUTORE DATA
F.N. s.p.a.		Bovolone/Verona di sede			
FONDAZIONE		FORMAZIONE			
MSE-ENEA PAR 2013		A/		n° J-50-0169	
LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE		SCALA		PART.	
Componente n°12		RE (kg)		SOSTITUITO DA	
		/Pezzo		SOSTITUIRE	



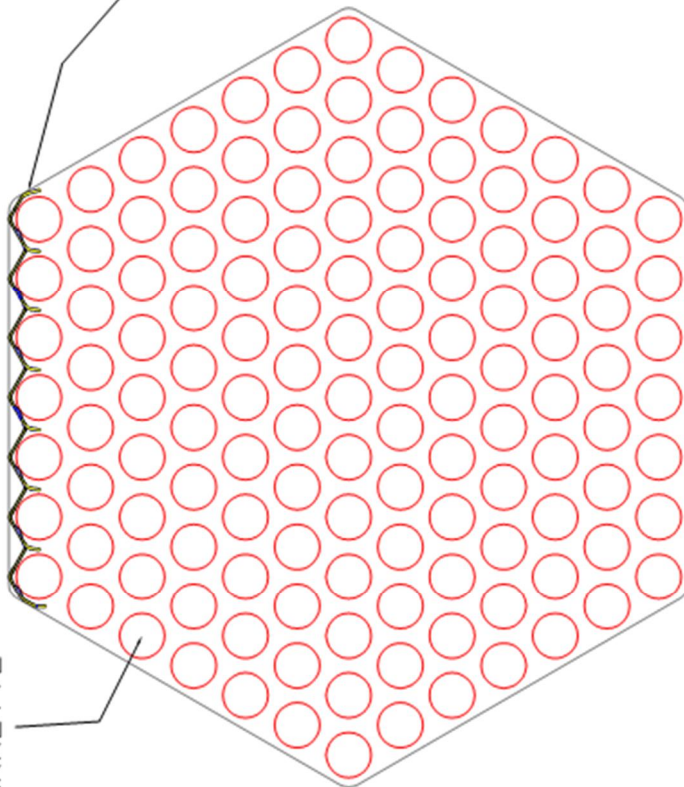




-Componente 14 Vista frontale dopo stampaggio e piegatura



FASCIO  
BARRETTE



POSIZIONE COMPONENTE 14  
o.l. MONTAGGIO GRIGLIA

SCALA 1 : 1

POS	DECOMPOSIZIONE	N. PEZZI	MATERIALE	NOTE	PESO Kg
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	EMESSO				
Previsione					
MODIFICHE					
DIS.				APPROV. AUTOM. DATA	
Comune/Carico di sede					
Classe prod.					
Classe mat.					
FORMATO					
A/					
SCALA					
PART.					
RE (dag)					
SOSTITUTO DA					
SOSTITUIRE					

**EnelMergero Alessandria Italy**

**FN S.p.A. NUOVE ENERGIE E SERVIZI JOINT-VENTURE**

Titolo: - MSE-ENEA PAR 2013  
- LP2 - GRIGLIA SPAZIATRICE  
- Componente n°14

FORMATO A/

SCALA

PART. n° J-50-0171

RE (dag)

SOSTITUTO DA

SOSTITUIRE