Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare Sustainable nuclear energy

A.a 2021/2022Sessione di Laurea marzo 2022





Sviluppo di processi innovativi per lo smantellamento del vessel e degli internals dei reattori LWR

Con riferimento alla centrale elettronucleare di Trino Vercellese

Relatore: prof.ssa Laura Savoldi

Correlatore esterno: ing. Silvio Cao

> Candidato: Marco Guerra

Indice

1 Introduzione							
2	L'in 2.1 2.2 2.3	Apianto di Trino VercelleseRecipiente in pressioneInternals2.2.1Upper package2.2.2Lower packageCircuito primario	12 13 15 16 16 20				
3	Ilp	Il processo di decommissioning					
0	3.1	Lo stato dell'arte	22				
	3.2	Lo scenario italiano e l'impianto Enrico Fermi	${24}$				
	3.3	Il taglio dei componenti nel decommissioning	27				
	3.4	I capisaldi del processo Hurricane	29				
4	Il taglio ad acqua e la tecnologia green-land 3						
	4.1	Il taglio ad acqua - la teoria	32				
		4.1.1 La pressione di esercizio	34				
		4.1.2 L'orifizio	36				
		4.1.3 L'abrasivo e il nozzle	37				
	4.2	Il catcher e la macchina $ASM^{\textcircled{R}}$	40				
		4.2.1 Il catcher	40				
		4.2.2 La macchina $ASM^{\mathbb{R}}$	42				
5	Preparazione dell'impianto 47						
	5.1	Attività preliminari	48				
	5.2	Allestimento piano di governo	50				
	5.3	Allestimento della piscina	54				
	5.4	La waste management facility	57				
6	Le f	fasi del processo green-land	60				
	6.1	Smantellamento della testa del vessel	61				
	6.2	Smantellamento degli internals	62				
		6.2.1 Upper package e dummies	63				
		6.2.2 Upper barrel \ldots	66				
		6.2.3 Barrel-baffles	68				
		6.2.4 Strutture inferiori	70				
	6.3	Smantellamento del contenitore cilindrico	70				
		6.3.1 Prima e seconda virola	71				

	 6.3.2 Trasferimento del vessel	• • • •	72 73 75			
7	Le macchine necessarie al decommissioning7.1Taglio componenti non attivi7.2Taglio contenitori cilindrici7.3Taglio dei tubi7.4Taglio delle piastre e componenti irregolari	· ·	76 77 78 80 82			
8	Conclusioni					
\mathbf{A}	A Gantt smantellamento internals					
Bibliografia						

Abstract

This master thesis presents an innovative process and the machines needed for the decommissioning of the vessel and the internals of LWR reactors. The procedure has been elaborated for the Enrico Fermi nuclear power plant in Trino Vercellese (VC) but, with some modifications/adjustments, it is applicable for the other light water reactors and also for other types. This work is the result of a strong collaboration with green-land S.r.l., an innovative startup with the aim of introducing new techniques in many fields of nuclear decommissioning. *Hurricane* process pursues three objectives:

- 1. Personnel doses reduction (ALARA principle) thanks to highly automative system in nowadays advanced technologies;
- 2. Time and overall costs reduction of decommissioning operations;
- 3. Reduction of the volume of the wastes that must be sent to the final deposit through the optimisation of containers filling and the recycle of non activated materials, using an innovative chemical decontamination process for surfaces.

The thesis starts from an introduction where few information are given in order to better understand the discussed themes and for framing the situation in which the work has been performed. Subsequently, in order to understand the complexity of the process and to make the decommissioning path easier to follow, Trino V. plant is described, with particular care for vessel and internals. The thesis continues with a frame on decommissioning procedures, focusing on Italian scenario. Previous studies and works performed on the Enrico Fermi plant are described and criticalities of traditial techniquies are addressed. Introductory part ends with a chapter on the cutting methodology adopted by **green-land**: the abrasive waterjet cutting (AWJC).

News introduced by **green-land** start with the patented catcher system, that permits the capture of liquid coming from the cutting process, and with ASM[®] machine, able to aspire the aforementioned liquid, to separate the radioactive solid part and eventually to permit the disposal after conditioning in cementitious matrix. Subsequently, plant preparation for decommissioning is described. It is expected the the presance of an automated and remote system, the realisation of a containment system and the construction of the Waste Management Facility (WMF). The thesis continues with detailed description of the operational procedures: low activated parts are cut with traditional techniques, while more radioactive ones will need **green-land** proposed technology. Conclusion is approached showing more in detail the innovative machines needed in the process. Final considerations about the procedure, the performed work and the planned activities of experimental verification and qualification are extracted from this study.

Sommario

Questa tesi magistrale si propone di presentare un processo innovativo e le relative macchine per il decommissioning del vessel e degli internals dei reattori LWR. La procedura è stata elaborata per l'impianto nucleare Enrico Fermi di Trino Vercellese (VC) ma, con le dovute modifiche/adattamenti, è applicabile anche ad altri impianti ad acqua leggera e non. Questo lavoro è frutto della stretta collaborazione con la **green-land** S.r.l., una startup innovativa che si propone di introdurre nuove tecniche in svariati campi del decommissioning in ambito nucleare. Il processo *Hurricane* persegue tre obiettivi:

- 1. Riduzione delle dosi al personale (principio ALARA) sfruttando la massima automatizzazione ammissibile grazie alle tecnologie oggi disponibili;
- 2. Riduzione di tempi e costi complessivi delle operazioni di decommissioning;
- 3. Riduzione del volume dei rifiuti da inviare al deposito definitivo attraverso l'ottimizzazione dei riempimenti degli imballaggi ed il riciclo dei materiali non attivati, utilizzando un innovativo processo di decontaminazione chimica delle superfici.

L'elaborazione della tesi inizia con un capitolo introduttivo in cui vengono fornite alcune informazioni per comprendere al meglio i temi trattati e per inquadrare la situazione in cui è stato svolto il lavoro. Successivamente, per poter comprendere le complessità della sfida e per permettere di seguire poi le fasi di smantellamento, viene descritto l'impianto di Trino V., con particolare cura verso il vessel e gli internals. L'elaborato prosegue con un inquadramento sul tema del decommissioning, proponendo uno spaccato dello scenario italiano, un approfondimento su quanto già fatto nell'impianto Enrico Fermi e sulle problematiche delle tecniche tradizionali. La parte introduttiva termina con un capitolo sulla metodologia di taglio adottata da **green-land**: il taglio ad acqua con abrasivo (AWJC).

Le novità introdotte da **green-land** iniziano con il sistema di catcher brevettato, il quale permette la captazione del liquido di risulta del taglio, e con la macchina ASM[®], capace di aspirare il liquido appena citato, separarne la parte solida attiva e infine permetterne lo smaltimento previo condizionamento in matrice cementizia. Successivamente viene descritta la preparazione dell'impianto, necessaria ad accogliere le operazioni di decommissioning. È previsto il posizionamento di sistemi di remotizzazione e automazione, la realizzazione del sistema di contenimento e la costruzione della Waste Management Facility (WMF). Si prosegue con la descrizione nel dettaglio della procedura: le parti debolmente attive vengono sezionate con tecniche tradizionali a cui sono associate bassi rischi di contaminazione dell'aria, le parti più attive invece richiederanno le tecnologie proposte da **green-land** che verranno utilizzate sotto battente d'acqua. Ci si avvia alla conclusione presentando più nel dettaglio le macchine di nuova concezione necessarie al processo, terminando infine con alcune considerazioni sulla procedura, sul lavoro svolto e sulle attività di verifica sperimentale e di qualifica previste.

Acronimi e sigle

LWR	=	Light Water Reactor
PWR	=	Pressurised Water Reactor
BWR	=	Boiling Water Reactor
ALARA	=	As Low As Reasonably Achievable
AWJC o AWJ	=	Abrasive WaterJet Cutting
RPV	=	Reactor Pressure Vessel
RVI	=	Reactor Vessel Internals
GV	=	Generatore di Vapore
NST	=	Neutron Shield Tank
UP	=	Upper Package
LP	=	Lower Package
SCRAM	=	Safety Control Rod Axe Man [1]
ENTOMB	=	Entombment
DECON	=	Immediate dismantling
SAFSTOR	=	Safe enclosure
PAC	=	Plasma Arc Cutting
GCR	=	Gas Cooled Reactor
MDM	=	Metal Disintegration Machine
$SCAB^{\textcircled{R}}$	=	Submerged Cutting Aspirated Box
$\mathrm{ASM}^{\textcircled{R}}$	=	Aspirazione Separazione Mescolamento
CFD	=	Computational Fluid Dynamics
ER	=	Edificio Reattore
PDG	=	Piano Di Governo
DACH®	=	Double Aspiration Cutting Head
WMF	=	Waste Management Facility
$\mathrm{TSM}^{\textcircled{R}}$	=	Tube Shearing Machine

Capitolo 1

Introduzione

Quello del decommissioning o smantellamento è un tema sempre più di attualità, in quanto i primi reattori costruiti si avvicinano o sono già arrivati alla fine del loro ciclo produttivo, solitamente per ragioni di sicurezza. Al 2018, 451 reattori nucleari commerciali erano in attività e allo stesso tempo 172 erano già stati spenti ed in attesa di smantellamento [2], questi sono poi saliti a 186 nel 2021 [3]. Per capire l'importanza della necessità di effettuare le operazioni di smantellamento, è sufficiente pensare che per i reattori normalmente in funzione ce n'è un ulteriore 40% in attesa di decommissioning. La nazione più virtuosa sotto questo punto di vista sono stati sicuramente gli Stati Uniti che hanno effettuato il decommissioning di circa 15 centrali [4], mentre il resto del mondo non ha dato un vero e proprio colpo di mano e si sono smantellati solamente alcuni impianti, principalmente grazie all'aiuto della Westinghouse Electric Company LLC.

Questa tesi magistrale si propone di presentare un processo innovativo e le relative macchine per il decommissioning delle parti più attive dei reattori nucleari ad acqua tipo PWR/BWR. Il lavoro è stato svolto presso la società **green-land** S.r.l., una startup innovativa che collabora attivamente con il gruppo di ricerca MAHTEP del Politecnico di Torino. I processi e le tecnologie adottate per il taglio del vessel e degli internals dei reattori ad acqua leggera fanno parte di un progetto di decommissioning, chiamato processo *Hurricane*, in corso di verifica sperimentale e di qualificazione "a freddo", senza cioè materiale radioattivo. La parte finale del processo che riguarda lo smaltimento dei rifiuti prodotti è oggetto della tesi magistrale della dott.ssa Francesca Crivelli [5], di cui si suggerisce la lettura per avere una panoramica completa dell'intero processo. Il progetto fa riferimento alla centrale nucleare Enrico Fermi di Trino Vercellese (VC) mostrata in Fig.1.1, ex ENEL, ed ora gestita dalla Sogin S.p.A..



Figura 1.1: Fotografia esterna dell'impianto di Trino V. [6]

Il processo Hurricane si propone tre obiettivi:

- Riduzione, per quanto ragionevolmente possibile, delle dosi di esposizione complessive al personale operativo impiegato per il decommissioning, in ottemperanza al principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), di cui al DL 31 luglio 2020, n.101 [7];
- 2. Riduzione dei tempi e costi complessivi delle operazioni;
- 3. Diminuzione dei volumi dei rifiuti radioattivi da inviare al deposito definitivo.

I primi due obbiettivi sono perseguiti attraverso:

- L'impiego della tecnologia di taglio a getto d'acqua con abrasivo (AWJC) di nuova generazione, alla pressione di esercizio di 600 *MPa*. Questa operazione viene effettuata sotto battente d'acqua e con l'aggiunta di un sistema di contenimento della contaminazione risultante dal taglio di materiali attivati/contaminati, principale causa di irraggiamento del personale operativo.
- La remotizzazione e l'automatizzazione delle operazioni, possibili grazie alle tecnologie oggi disponibili.

Per quanto riguarda il terzo obbiettivo, il progetto prevede l'ottimizzazione dei riempimenti degli imballaggi, attraverso un'accurata valutazione dei materiali risultati dalla segmentazione di vessel ed internals. Parallelamente verrà privilegiato il riciclo dei materiali non attivati, segmentati mediante macchine di taglio di nuova generazione e trasportati alla fonderia convenzionale, previo l'impiego di un innovativo processo di decontaminazione chimica delle superfici. Dopo aver esposto gli obiettivi del processo green-land, è il caso di rispondere alla domanda "perché proprio il vessel e gli internals?". Perché sia importante la tematica dello smantellamento, è chiaro dalle prime righe del capitolo, ma qual è il motivo di concentrarsi proprio su questi due componenti?

Removal of the reactor internals and the reactor pressure vessel is usually on the critical path of the nuclear power plant decommissioning program. It is also expected to belong to the most difficult activities. - [8]

La motivazione risiede nella loro elevata attività, data dal flusso neutronico generato dal combustibile che lavora in condizioni nominali, il quale durante gli anni ha attivato alcuni elementi/impurità dei metalli strutturali (principalmente nichel e cobalto). Stando gli elementi di combustibile proprio all'interno del vessel ed essendo circondati da alcuni elementi degli internals, è facile intuire come questi si siano attivati maggiormente rispetto agli altri componenti, che non si trovavano sulla traiettoria dei neutroni uscenti dal nocciolo.



Figura 1.2: Sezione di un reattore nucleare con rappresentazione del flusso del refrigerante primario [9] e [10]

Similmente, è possibile capire come mai gli internals siano molto più attivi del vessel (si veda [11] per valori numerici), infatti i primi sono a stretto contatto con gli elementi di combustibile e sono separati da un sottilissimo strato d'acqua, come mostrato in Fig.1.2. Il vessel invece è schermato parzialmente dal flusso neutronico dallo spesso strato d'acqua il quale modera (rallenta) e assorbe i neutroni.

Dopo aver parlato di *attivazione*, è necessario descriverne l'esatto significato e, soprattutto per i capitoli successivi, sarà fondamentale dare anche la definizione di *contaminazione*. Per queste due situazioni diverse si fa riferimento all'art. 7 del DL 31 luglio 2020, n.101 [7]:

«attivazione»: processo per effetto del quale un nuclide stabile si trasforma in radionuclide, a seguito di irradiazione con particelle o con fotoni ad alta energia del materiale in cui è contenuto. - [7]

Si parla di attivazione, quindi, nel caso di materiale che è stato irraggiato direttamente ed è diventato radioattivo di per sé. Quello di contaminazione, è invece un concetto strettamente collegato a quello di attivazione, infatti:

«contaminazione»: la presenza involontaria o non intenzionale di sostanze radioattive su superfici o all'interno di solidi, liquidi o gas o sul corpo umano. -[7]

Per contaminazione si intende quindi il caso in cui del materiale radioattivo, sia esso il risultato di attivazione o del processo di fissione, sia stato depositato su un oggetto inattivo. Si ha contaminazione ad esempio in tutto il circuito primario e all'interno del vessel. Durante l'attività di funzionamento normale del reattore può accadere infatti che alcune guaine del combustibile si fessurino e perdano materiale radioattivo, il quale, grazie al flusso dell'acqua, viene disperso all'interno dell'intero circuito di raffreddamento.

Un'altra differenza fondamentale risiede nelle azioni che possono essere intraprese contro una o l'altra situazione. È facile intuire l'impossibilità di contrastare a posteriori l'attivazione del materiale, in quanto il tempo di dimezzamento di ogni elemento ha valori costanti, l'unica contromisura rimane quindi la schermatura. La contaminazione ha invece la proprietà intrinseca di poter essere rimossa, tutto il materiale attivo viene quindi concentrato in un volume definito e successivamente condizionato e smaltito secondo normativa. Quest'azione viene chiamata *decontaminazione* e ad oggi esistono svariati metodi, ognuno con i suoi pro e i suoi contro. **green-land** ha sviluppato con il Politecnico di Torino un processo di tipo chimico (non oggetto di questa tesi) ed in parallelo, per alcune applicazioni, utilizzerà un processo di decontaminazione di tipo fisico, mediante l'impiego di acqua ad alta pressione, capace di rimuovere fisicamente le particelle contaminanti più superficiali.

Si vuole concludere questo capitolo introduttivo riferendo che in Francia, la centrale nucleare di *Chooz A*, e negli Stati Uniti quella di *Yankee Rowe*, sono state dotate di un reattore analogo a quello di Trino, in quanto forniti anch'essi dalla Westinghouse Electric Company LLC. Alcune informazioni mancanti sulla centrale di Trino o immagini più esplicative sono state conseguentemente ricavate dall'rimpianto di Chooz A.

Capitolo 2

L'impianto di Trino Vercellese



Figura 2.1: Rappresentazione dell'impianto elettronucleare di Trino Vercellese [12]

La centrale elettronucleare Enrico Fermi (Fig.2.1) si trova a Trino Vercellese (VC) ed è costituita da una sola unità di potenza pari a 825 MWt e 272 MWe [13]. Questa struttura sorge sulla riva settentrionale del fiume Po, il quale funge da serbatoio termico per il condensatore del ciclo Rankine dell'impianto. Il reattore è stato fornito dalla *Westinghouse International Electric Company*, oggi *Westinghouse Electric Company LLC* ed è un PWR di prima generazione raffreddato e moderato ad acqua leggera.

La costruzione della centrale iniziò nel 1961 e finì con l'inizio del pre-esercizio nel 1964, culminando con l'entrata in funzione effettiva avvenuta in data 1° gennaio 1965. La sua interruzione di servizio è avvenuta nel 1987 dopo aver prodotto all'incirca 25 TWh con un load factor cumulativo di circa 88%, ma arrivando a raggiungere picchi del 98% [14]; la sua chiusura definitiva è invece avvenuta nel 1990. Durante l'attività non del tutto lineare, è stato segnalato il cedimento strutturale dello scudo termico (si veda Cap.2.2.2) che ha comportato un periodo di fermo, la sua successiva rimozione e infine la sostituzione di otto elementi esterni di combustibile con *elementi finti*, chiamati *dummies*.

L'elemento più importante dell'impianto, anche per quanto riguarda questo studio, è il recipiente a pressione (RPV) o *vessel*, ovvero il serbatoio che contiene il combustibile e dentro al quale avvengono le reazioni di fissione che permettono di riscaldare l'acqua che circola al suo interno. Le strutture interne che sostengono il combustibile e permettono al flusso d'acqua di seguire un percorso prestabilito, si chiamano *internals* (RVI) e rappresentano un problema in tutti i lavori di decommissioning (Si veda Cap.6.2). Dal vessel partono otto tubazioni, quattro di mandata (gambe calde) e quattro di ritorno (gambe fredde) che compongono il circuito primario.

Questo circuito primario o semplicemente *primario* è la parte di impianto che permette all'acqua calda proveniente dal vessel di riscaldare l'acqua nel circuito secondario, in modo poi da produrre vapore che verrà fatto circolare in turbina per la produzione di energia elettrica. La temperatura del refrigerante primario passa da $297^{\circ}C$ a $266,5^{\circ}C$ e vice versa, mentre il sistema si trova alla pressione media di 138 *bar* per mantenere l'acqua in fase liquida. Il primario è diviso in quattro rami, ognuno dei quali è dotato di un generatore di vapore (GV), una pompa di circolazione ed una coppia di valvole e verrà meglio descritto nel Cap.2.3.

Per entrare nell'argomento di questo lavoro è necessario descrivere con precisione i componenti che interessano direttamente la procedura di decommissioning dell'impianto.

2.1 Recipiente in pressione

Il vessel di Trino è un grande recipiente in pressione del peso di circa 240 ton, suddiviso in due parti, la prima è rappresentata dal coperchio o testa pesante 50 ton, la quale è fissata al resto del vessel con quarantadue viti. La seconda parte è costituita da un contenitore cilindrico avente il fondo bombato quasi emisferico ed otto fori ai quali si collegano le tubazioni di primario, dal peso complessivo di 190 ton. Il contenitore cilindrico e la testa sono realizzati in acciaio ASME SA 302 gr.B¹ all'interno del quale è saldata una lamiera di 4 mm di acciaio inossidabile AISI 304, mentre i bocchelli e le flange sono costituiti da acciaio ASME SA 336².

 $^{^{1}0,20\%}$ C, 1,15-1,50% Mn, 0,025% P, 0,025% S, 0,15-0,40% Si, 0,45-0,60% Mo

 $^{^{2}0-0.12\%}$ C, 0-1.00% Mn, 0-0.025% P, 0-0.025% S, 0-1.00% Si, 11.50-13.50% Cr, 0-0.50% Ni



Figura 2.2: a) Disegno 3D del vessel [15] b) Dimensioni del vessel [14] c) Composizione del vessel [14]

Le parti iniziali dei tubi di collegamento tra il vessel e il circuito primario hanno gli stessi spessori del recipiente a pressione, ovvero 219 mm, per questa ragione verranno riferiti come parti dello stesso e non del primario. Queste parti si chiamano bocchelli o boccagli ed hanno diametro interno di 524 mm. Un'altra peculiarità del contenitore cilindrico è la flangia che permette il fissaggio della testa, questa infatti ha uno spessore di 480 mm e la sua sezionatura rappresenta una grande sfida tecnica, resa ancor più complessa dal diametro esterno di 3943 mm, mentre la sua altezza è pari a 2229 mm. Si sottolinea però che le dimensioni normali del contenitore cilindrico sono meno limitanti (si veda Fig.2.2) rispetto al caso estremo della flangia.

Un'altra grande limitazione delle operazioni è costituita dal peso del vessel, superiore alla portata massima della gru presente (Cap.5). Inoltre, anche la lunghezza dello stesso di 9514 mm rappresenta un ostacolo alla sua movimentazione per intero nella piscina del reattore.

Oltre agli aspetti fisici appena descritti, il vessel rappresenta uno dei due punti chiave del decommissioning di una centrale anche per le problematiche legate alla sua radioattività. A causa del grande flusso neutronico a cui è stato sottoposto durante l'attività della centrale, il vessel risulta essere il secondo componente più attivo, soprattutto a causa dell'attivazione del cobalto e del nichel, i quali decadono secondo le reazioni:

$${}^{60}\text{Co} \to {}^{60}\text{Ni} + \beta^- + \gamma \quad (emivita = 5,27 \ anni) \tag{2.1}$$

$$^{63}\text{Ni} \rightarrow ^{63}\text{Cu} + \beta^{-} \quad (emivita = 100, 1 \ anni) \tag{2.2}$$

⁵⁹Ni
$$\rightarrow$$
 ⁵⁹Co + β^+ (emivita = 76000 anni) (2.3)

Il vessel appoggia mediante otto supporti esterni ad una struttura chiamata Neutron Shield Tank o NST, mostrata in Fig.2.3. Questo componente ha le funzioni di sorreggere il recipiente in pressione e di assorbire i neutroni che riescono ad evadere dal vessel stesso, in modo da impedire l'attivazione della struttura di cemento circostante. All'interno dell'NST scorre dell'acqua in ciclo chiuso per il suo raffreddamento.



Figura 2.3: Sezione del reattore con dettaglio del NST e suo disegno 3D [16]

2.2 Internals

Gli internals del reattore di Trino si dividono in due sezioni: l'Upper Package (UP) e il Lower Package (LP). Queste due sezioni sono a loro volta costituite da uno o più elementi. La loro funzione è principalmente di tipo strutturale, questi infatti sorreggono gli elementi di combustibile e mantengono in posizione sia gli elementi stessi che le barre di controllo che penetrano il vessel. Secondariamente svolgono anche un'azione di convogliamento del flusso d'acqua e di miscelamento del refrigerante. Tutti gli internals sono realizzati in acciaio inossidabile austenitico AISI 304 ad eccezione della top support plate e della piastra di fusione inferiore, prodotte in acciaio ASTM A351 CF8M, corrispondente al ben noto AISI 316.

È importante sottolineare che gli internals sono attualmente la parte più radioattiva dell'impianto, sia in termini assoluti ($Bq \circ Ci$) che specifici (Bq/g). La loro attivazione è data, come è facile immaginare, dalla vicinanza al flusso neutronico generato dagli elementi di combustibile e raggiunge valori molto importanti (Tab.2.1) che rendono gli internals la parte più complessa del processo di decommissioning.

2.2.1 Upper package

L'UP è costituito da un componente singolo, ottenuto dalla saldatura di cinquantadue tubi di protezione delle barre di controllo a due piastre, una superiore (*top support plate*) e una inferiore (*upper core plate*) come raffigurato in Fig.2.4.



Figura 2.4: Disegno 3D dell'upper package del reattore [15]

Partendo dal basso si trova l'upper core plate, una piastra forata di diametro esterno pari a 2694 mm e dallo spessore di 38 mm, alla quale è associato un peso di 972,50 kg. A questa sono saldati i tubi di spessore e diametro ignoti (valori stimati: diametro interno $\sim 200 \text{ mm}$ e spessore $\sim 10 \text{ mm}$). La loro altezza è di 2346 mm e il peso complessivo è 8018,92 kg. Il tutto termina con una grossa piastra forata, la top support plate, di spessore 213 mm ed avente diametro pari a 3024 mm e un peso di 6803,90 kg.

L'UP non è imbullonato o saldato ma si incastra in 8 spinotti (4 sopra e 4 sotto) imbullonati al LP in modo da facilitarne l'estrazione per le operazioni di refuelling.

2.2.2 Lower package

Il lower package può essere schematicamente diviso in più sezioni a differenza dell'UP, ha un peso quasi doppio rispetto a quest'ultimo (~ 29 contro ~ 16 ton) ed è alto circa 8700 mm, ovvero quasi come il RPV e più di 3 volte l'UP. L'LP si divide dall'alto verso il basso in *upper barrel*, sistema cilindro-deflettore o *barrel-baffles* e strutture inferiori. Queste sezioni sono a loro volta divise in uno o più elementi come si vede in Fig.2.5.



Figura 2.5: Disegno 3D degli internals del reattore Chooz A [8]

L'upper barrel è un cilindro con 4 fori che direzionano il refrigerante, riscaldato dopo il passaggio nel nocciolo, verso le gambe calde del circuito primario. Il componente, raffigurato in Fig.2.6 ed in trasparenza in Fig.2.5, ha un diametro interno pari a 2718 mm con uno spessore di circa 35 mm, un'altezza pari a 2607 mm ed un peso di 6470,50 kg. L'estremità superiore è costituita da una flangia rinforzata che ha il compito di sostenere tutto il lower package e gli elementi di combustibile (durante la fase di esercizio del reattore).



Figura 2.6: Disegno 3D dell'upper barrel del reattore [14]

Una caratteristica citata in [17] ma non chiara dalla Fig.2.6 è la separazione tra l'upper barrel e il barrel-baffles, infatti questi due componenti sembrano essere esternamente un tutt'uno ma sono in realtà collegati da ottanta bulloni. Il barrel-baffles, come dice il nome, è costituito da due elementi inseriti uno dentro l'altro: un guscio cilindrico esterno (barrel - Fig.2.7b) e un pacco interno di deflettori (baffles - Fig.2.7a) che distribuiscono uniformemente il refrigerante ove è necessario, ovvero attorno agli elementi di combustibile.



Figura 2.7: Disegni 3D dei a) baffles [18] e del b) barrel [14]

I due pezzi sono fissati alle estremità attraverso ottanta bulloni in alto (condivisi con il cilindro superiore) e cinquantasei bulloni in basso (condivisi con la piastra inferiore). Il diametro esterno del complesso è pari a 2781 mm ed ha un'altezza di 3019 mm. Lo spessore dei baffles non è noto, mentre lo spessore del barrel è presumibilmente comparabile a quello dell'upper barrel. Il peso complessivo è di 9449 kg. All'esterno di questa sezione era presente originariamente lo *scudo termico*, un guscio cilindrico di acciaio inossidabile con lo scopo di limitare il flusso neutronico verso il vessel e quindi all'esterno.

Le strutture inferiori (Fig.2.8) sono un insieme di 4 componenti che hanno la funzione di sostenere la strumentazione inferiore del RPV e di assorbire l'urto dovuto al rapido abbassamento delle barre nel caso di SCRAM del reattore.



Figura 2.8: Rappresentazione delle strutture inferiori interne al RPV [8]

Partendo dal barrel-baffles verso il fondo del vessel si trova la piastra inferiore del nocciolo di diametro pari a 2799 mm, spessore di 38 mm e peso 1192,90 kg. A questa sono saldati i tubi di guida con funzione strutturale, i quali, come i loro equivalenti presenti nell'UP (Cap.2.2.1) sono di diametro e spessore ignoti, ma di cui si conoscono il peso totale di 8257,60 kg e l'altezza di 2961 mm; si presuppone però che abbiano spessore analogo a quelli superiori. Imbullonati alla piastra ci sono anche i supporti radiali cruciformi che servono a dare stabilità radiale agli internals (375 kg). All'estremità inferiore si trova la bottom support plate o piastra di fusione inferiore, avente forma particolare e ignota, si conoscono il diametro pari a 3024 mm e il peso di 3458,70 kg. Tutta questa sezione è alta circa 3212 mm.

Al fine di definire lo smaltimento dei componenti segmentati degli internals, è necessario definire la loro attività, infatti i componenti più attivi andranno inseriti nei contenitori per la media attività (SBoX[®] [19]), mentre gli altri andranno inseriti nei contenitori leggeri (CP-5.2 [20]) come definito nella tesi della dott.ssa Crivelli [5].

L'attività delle varie parti degli internals data dal ⁶⁰Co e riferita a trent'anni dallo spegnimento dell'impianto, è stata ricavata dall'articolo di Rossini et al [14]. Per riferire questi valori a date più reali, si è calcolata l'attivazione al 1° gennaio 2025, data ipotizzata per l'inizio dei lavori di decommissioning di Trino.

Componente	Attività specifica [Bq/g]	Attività [Bq]	Attività [Ci]
Guide tubes under	$1,\!17\mathrm{E}{+}00$	$2{,}55\mathrm{E}{+}06$	6,89E-05
top support plate			
Upper barrel	$1,\!15\mathrm{E}{+}03$	$7,\!44\mathrm{E}{+}09$	2,01E-01
Intermediate guide tubes	$4,\!57\mathrm{E}{+}03$	$6{,}70\mathrm{E}{+}09$	1,81E-01
Guide tubes above the core	$4{,}36\mathrm{E}{+}05$	$2{,}80\mathrm{E}{+}11$	$7{,}56\mathrm{E}{+00}$
Upper core plate	$1,\!12\mathrm{E}{+}07$	$1,\!09\mathrm{E}{+}13$	$2,95E{+}02$
Barrel - baffles	$5{,}73\mathrm{E}{+}06$	$5{,}41\mathrm{E}{+}13$	$1,\!46\mathrm{E}{+}03$
Dummies	$7{,}23\mathrm{E}{+}07$	$8,\!48\mathrm{E}{+}13$	$2{,}29\mathrm{E}{+}03$
Lower core plate	$2{,}07\mathrm{E}{+}07$	$2,\!47\mathrm{E}{+}13$	$6{,}66\mathrm{E}{+}02$
Radial cruciform core support	$2,\!07\mathrm{E}{+}07$	$7,75E{+}12$	$2,09E{+}02$
Guide tubes under the core	$4,78\mathrm{E}{+}01$	$1,\!98\mathrm{E}{+}08$	5,35E-03
Guide tubes above the	$3,\!01\mathrm{E}\text{-}01$	$1{,}24\mathrm{E}{+}06$	3,36E-05
lower support plate			

Tabella 2.1: Attivazione degli internals al 1/1/2025 - dati presi da [14]

Il calcolo è stato eseguito considerando il decadimento naturale del ⁶⁰Co utilizzando la nota formula:

$$A_{(t)} = A_0 e^{-\lambda t} \tag{2.4}$$

dove A è l'attività riferita al tempo to all'istante iniziale (0), t il tempo e λ la costante di decadimento calcolata considerando il tempo di dimezzamento di 5,27 anni, uguale a 0,131 1/anni.

2.3 Circuito primario

Il circuito primario mostrato in Fig.2.9, come già enunciato nel titolo, non rientra in questo lavoro che è limitato alla procedura di smantellamento del vessel e degli internals. È importante però parlare di questa parte dell'impianto in quanto il suo smantellamento è previsto subito dopo il vessel e gli internals.

La caratteristica del circuito primario per quanto riguarda il decommissioning, è il fatto che la radioattività è data principalmente da contaminazione portata dal flusso d'acqua contenente i radionuclidi. La distanza degli elementi del primario dal nocciolo ha fatto sì che i neutroni non arrivassero ad attivarne il metallo, a differenza invece del vessel e degli internals. In tutti e tre i casi però la parte a contatto con l'acqua ha subito anche un degrado chimico dovuto alla formazione di un ossido esterno non pericoloso per l'integrità strutturale. È proprio in questo strato di ossido che è presente il 90% circa dei radionuclidi contaminanti, circa il 9% invece riesce a penetrare più in profondità nel metallo.



Figura 2.9: Raffigurazione circuito primario dell'impianto di Trino V. [21]

Dopo l'uscita del liquido termovettore riscaldato dal vessel attraverso i bocchelli "caldi", si trova una valvola di sicurezza per ogni tubazione, analoga alle altre ubicate nelle gambe fredde. Successivamente il liquido entra nei generatori di vapore, scambiatori di calore che trasferiscono il calore dal fluido primario all'acqua a 33,3 *bar* del secondario, la quale raggiunge il punto di evaporazione. Com'è noto, sarà questo vapore, ripulito dalle goccioline di liquido residue, a venir immesso in turbina al fine di produrre energia elettrica.

Dopo aver ceduto calore all'interno del GV, il liquido di primario raffreddato viene aspirato dalle pompe centrifughe ad uno stadio (una per gamba) le quali garantiscono la prevalenza necessaria al fluido per vincere le perdite di carico di tutto il circuito.

A valle della pompa il liquido incontra una seconda valvola di sicurezza per rientrare nel vessel. Su una delle quattro gambe calde, è collegato il pressurizzatore, un serbatoio in grado di regolare la pressione del circuito primario agendo sulla temperatura del fluido e quindi sulla sua densità.

Capitolo 3

Il processo di decommissioning

3.1 Lo stato dell'arte

Per *decommissioning* di una centrale nucleare, si intende il portare il sito dove la stessa è realizzata in condizioni di prolungata sicurezza radiologica. Per fare ciò esistono tre diverse strade:

- *Entombment* (ENTOMB): La centrale viene svuotata del combustibile ad altissima attività e successivamente viene sigillata in modo permanente, ad esempio con colate di cemento nelle aree più attive o con la creazione di barriere.
- *Immediate dismantling* (DECON): La centrale viene decostruita parte dopo parte subito dopo l'interruzione della sua attività.
- Safe enclosure (SAFSTOR): Questa procedura è perfettamente analoga a quella precedente con la sola differenza che viene eseguita dopo un periodo più o meno lungo dalla chiusura della centrale.

Tutte le tre possibilità di decommissioning hanno vantaggi e svantaggi. Per esempio la soluzione di ENTOMB è fortemente sconsigliata per la bassa sicurezza che è in grado di garantire associata al deturpamento definitivo del sito interessato. Nonostante questo, come facilmente intuibile è però la più economica fino al medio termine. Le altre due metodologie rientrano nella categoria di *dismantling* o smantellamento in quanto il sito viene ripristinato alla sua condizione iniziale, di cosiddetto green field. Più costose della prima opzione, la scelta di una o dell'altra strada è dettata da un bilancio rischi/costo, in quanto il decommissioning immediato è economicamente non conveniente a causa dell'alta attività della centrale. Lasciando passare decine di anni prima di iniziare le operazioni, permette agli isotopi a breve emivita di decadere, ma allo stesso tempo, durante questo periodo di attesa la centrale non può definirsi in totale sicurezza e vanno considerati i costi di sorveglianza.



Figura 3.1: Confronto dei costi delle tre strade di decommissioning [22]

Nel mondo, solamente per tre impianti è stata impiegata la metodologia di ENTOMB (Piqua, Hallam e BONUS, tutti negli USA [4]), cinquanta sono già stati smantellati, altrettanti stanno attendendo in modalità SAFSTOR mentre per gli altri la decisione non è ancora stata presa [3]. In Europa così come negli Stati Uniti le distribuzione di DECON e SAFSTOR è simile ed è all'incirca del 50% per entrambe, si evidenzia però un picco di reattori per cui è stato previsto lo smantellamento immediato in Germania (diciannove unità), mentre solamente negli USA, per ragioni di spazio, è stato adottato l'entombment.

Come mostrato in Fig.3.1 e discusso nei paragrafi precedenti, il costo del decommissioning è senz'altro un aspetto chiave, è infatti questo uno dei tre pilastri cardine della proposta **green-land**. In generale i costi totali di questa attività (DECON o SAFSTOR) sono nell'ordine di alcune centinaia di milioni di dollari, ma sono molto variabili. Per i reattori americani il costo varia da 544 M\$ a 821 M\$, mentre per alcune centrali europee si è passati da 326 M\$ (Loviisa) a 1140 M\$ (Bohunice) [3]. Un altro dato interessante è la costanza del costo di decommissioning per una singola centrale, la sua dimensione infatti influisce poco, lo dimostrano i costi al MWe che variano da circa mezzo milione di dollari per MWe nel caso di centrali da 1100 MWe e raddoppia per centrali di dimensione pari alla metà [3].



Figura 3.2: Divisione dei costi associati al decommissioning [22]

Nello specifico, in Fig.3.2 è mostrato quanto alcune parti del decommissioning incidano sui costi dello stesso ed emerge chiaramente come il personale (operativo e dirigenziale) sia la voce più influente. La parte di smantellamento vero e proprio rappresenta soltanto un quarto circa del costo, mentre una quota significativa è associata ai rifiuti, per i quali si deve considerare tutto il ciclo, dall'acquisto del contenitore, alla gestione, alla caratterizzazione, allo spostamento ecc.

Sono state già eseguite delle stime iniziali per il costo dello smaltimento del vessel e degli internals del reattore di Trino da parte di **green-land**. Il valore ottenuto non è divulgabile (per ragioni industriali), ma è emerso subito molto importante la quota associata alla realizzazione e all'acquisto delle macchine necessarie (Cap.5 e Cap.7). È importante sottolineare che queste stime fanno riferimento soltanto alla parte legata al vessel e agli internals e non quindi al costo totale rappresentato in Fig.3.2. Un'altra ragione della differenza riscontrata con la letteratura, risiede nell'aver associato il costo di un macchinario interamente alla "commessa Trino", nel momento in cui la stessa macchina venisse riutilizzata per altri impianti (Garigliano, Caorso, Latina o altri) il costo verrebbe ammortizzato.

3.2 Lo scenario italiano e l'impianto Enrico Fermi

In Italia sono presenti quattro centrali nucleari da smantellare: Latina (LT), Garigliano (CE), Trino (VC) e Caorso (PC); quattro impianti di ricerca sul ciclo del combustibile: Eurex di Saluggia (VC), Itrec di Rotondella (MT), Opec ed Ipu di Casaccia (RM); ed un impianto di fabbricazione del combustibile di Bosco Marengo (AL) [23]. La società italiana che dal 1999 si occupa del decommissioning delle centrali nucleari è la Sogin S.p.A. alla quale sono stati affidati anche gli impianti di ricerca nel 2003 e l'impianto di Bosco Marengo nel 2005. Da subito la società si è attivata nel raggiungere l'obiettivo ed è stata elaborata la sequenza delle attività di smantellamento con le rispettive tempistiche (Fig.3.3).



Figura 3.3: Fasi e tempistiche del decommissioning delle centrali italiane [24]

Come sottolineato in Fig.3.3, l'impianto di Trino Vercellese avrebbe dovuto essere portato a green field nel 2017, ma le operazioni stanno procedendo a rilento (fatto portato all'attenzione pubblica di recente [25]), ragion per cui viene proposta la procedura **Green**land oggetto di questo lavoro. In questi anni sono stati però effettuati numerosi lavori [6]:

- Smantellamento delle torri di raffreddamento;
- Rimozione dei generatori diesel di emergenza, i quali non essendoci più produzione di calore dovuta al decadimento naturale del combustibile, non sono più necessari;
- Decontaminazione chimica dei generatori di vapore e delle pompe del circuito primario. La superficie contaminata era pari a 5220 m^2 , sono stati rimossi circa $7 \cdot 10^{11} Bq$ di attività generando però 15 m^3 di resine a scambio ionico di rifiuto;
- Smantellamento del circuito secondario. La turbina di bassa pressione è stata posizionata nel piazzale della centrale a fini estetici (Fig.3.4);
- Asportazione della diga di ritenuta;
- Sostituzione del vecchio impianto di circolazione dell'acqua del fiume (progettato per l'impianto in condizioni di lavoro nominali), riducendone drasticamente la potenza e utilizzando tecnologie più moderne;

• Rimozione di altri componenti inutilizzati.

Si ricorda che il combustibile e le barre di controllo sono già stati rimossi dal vessel nel 1992, per approfondire la successione delle operazioni si suggerisce la lettura di [26].



Figura 3.4: Turbina a bassa pressione del circuito secondario dell'impianto Enrico Fermi [27]

Considerando l'esperienza maturata e il ritardo accumulato, è stato realizzato un nuovo calendario delle azioni necessarie per l'arrivo alla condizione di green field, che dovrebbe essere raggiunta nel 2036 (Fig.3.5).



Figura 3.5: Fasi e tempistiche del decommissioning della centrale di Trino [6]

Quello della centrale di Trino Vercellese, sarà un decommissioning SAFSTOR in quanto, come riportato nel Cap.2, la centrale è stata chiusa più di trent'anni fa e le operazioni di smantellamento non sono iniziate immediatamente. Il combustibile è stato infatti rimosso nel 1992 e le varie operazioni sopra elencate sono state effettuate da allora fino ad oggi.

3.3 Il taglio dei componenti nel decommissioning

Per poter parlare di smantellamento di una centrale di qualunque tipo, le parti ingombranti di questa devono essere ridotte di volume e poi smaltite o riciclate. Il taglio dei componenti, diventa quindi una delle chiavi per garantire l'efficacia di un processo di tipo DECON o SAFSTOR e, in campo nucleare, data la radioattività, diventa una vera e propria sfida. Spesso infatti è proprio la metodologia di taglio a caratterizzare una procedura di decommissioning ed è sempre un parametro esplicitato quando la procedura stessa viene presentata, come ad esempio nel report [18].

Impianto, paese	Tipo di reattore	Anno	Tecnica
Three Mile Island 2, USA	PWR	1986-1989	PAC
Fort St. Vrain, USA	GCR	1990 - 1992	PAC
Shorehan, USA	BWR	1990 - 1992	PAC
Yankee Rowe, USA	PWR	1992 - 1994	PAC
Trojan, USA	PWR	1995 - 1996	AWJC
Connecticut Yankee, USA	PWR	1999-2002	AWJC
San Onofre 1, USA	PWR	2001 - 2002	AWJC
Big Rock Point, USA	BWR	2002 - 2003	MDM
Grand Gulf, USA	PWR	2011 - 2012	Taglio meccanico
Fukushima Daiichi 2, Giappone	BWR	1999	Taglio meccanico
Karlsruhe, Germania	Sodio	2001 - 2005	Taglio meccanico
Forsmark 1-2-3, Svezia	BWR	2000-2012	Taglio meccanico
Oskarshamn 1-2, Svezia	BWR	2003 - 2013	Taglio meccanico
Okiluoto 1-2, Finlandia	BWR	2004 - 2012	Taglio meccanico
BCOT, Francia	PWR	2010 - 2012	Taglio meccanico
Chooz A, Francia	PWR	2010 - 2016	Taglio meccanico
Zorita, Spagna	PWR	2010-2012	Taglio meccanico

Tabella 3.1: Centrali smantellate dalla Westinghouse Electric Company LLC - dati presi da [28]

In passato, svariate tecniche sono state utilizzate per il taglio del vessel, ad oggi però i metodi meccanici sono preferiti, come si evince dalla Tab.3.1. Le tipologie di macchina per effettuare il taglio meccanico sono due: sega a nastro oppure sega a disco, entrambe mostrate in Fig.3.6.



Figura 3.6: Metodologie di taglio tradizionali impiegate all'impianto di Zorita: a) sega a nastro [29] b) sega a disco [8]

Ognuno dei due metodi ha vantaggi e svantaggi rispetto all'altro, ragion per cui vengono ancora impiegati entrambi in base all'applicazione specifica.

More significant challenges result from the debris generated during the segmentation of highly-activated components, such as the internals of the reactor vessel. -[30]

In comune hanno però il problema della produzione di sfridi (Fig.3.7 e citazione soprastante), i quali in campo nucleare possono essere attivi e la loro dispersione porterebbe ad una contaminazione della piscina di segmentazione, la quale a sua volta richiederebbe tempo e risorse per la pulizia. In passato sono state provate molte altre tecniche, tra cui spicca il taglio termico, unica valida alternativa ai tagli meccanici per i grandi spessori. Questa infatti non ha problemi di produzione di sfridi, bensì emette gas che fungono da vettori per particelle attive, di ben più difficile captazione rispetto agli sfridi del taglio meccanico.



Figura 3.7: Dettaglio dei trucioli prodotti dalla segmentazione mediante sega a nastro [8]

Le metodologie di taglio sono trasversali al componente da tagliare, entrambe le tecnologie meccaniche vengono utilizzate sia per il vessel che per gli internals, solitamente sotto battente d'acqua. Il taglio termico viene invece impiegato solamente per i grandi spessori del recipiente a pressione oppure per componenti non attivi, sempre di dimensioni importanti.

3.4 I capisaldi del processo Hurricane

I capisaldi del processo Hurricane proposto dalla da **green-land** sono molteplici e toccano le attività di decommissioning del vessel e degli internals in diversi aspetti: sicurezza, radioprotezione, processo, macchinari, waste management e non ultimo quello economico.

Il decommissioning del vessel e degli internals consiste nella segmentazione delle parti attive che viene eseguita sempre sotto battente d'acqua, con invio del materiale risultante alla Waste Management Facility per il suo condizionamento in contenitori parallelepipedi, generalmente adottati in Europa per i rifiuti del decommissioning a bassa media attività. I componenti non attivi o con attività specifica inferiore ad 1 Bq/g vengono segmentati all'interno di apposite tende di contenimento con speciali grandi macchine automatiche di taglio meccanico di produzione nazionale.

La novità del processo risiede nel metodo di segmentazione dei materiali attivi, anche di grande spessore, il quale viene effettuato:

- Mediante getto d'acqua con abrasivo di grande potenza, come descritto nel Cap.4.1;
- Con l'aggiunta di un sistema di captazione (Cap.4.2.1) per il contenimento dei materiali di risulta del taglio quali acciaio e abrasivo;
- Utilizzando a valle un macchina (Cap.4.2.2) per l'aspirazione del materiale di risulta. Questa macchina opera in continuo la separazione meccanica (mediante centrifugazione) delle particelle solide dall'acqua, che viene rinviata al sistema di trattamento del reattore.

Da osservare che il fluido di taglio per il sistema AWJC è prelevato dal circuito acqua del reattore, cioè senza l'introduzione di liquido dall'esterno. Al separatore centrifugo, una volta riempito con la quantità designata di particelle solide, viene aggiunto cemento per il condizionamento del rifiuto radioattivo. Questo contenitore ha la stessa geometria e specifiche di costruzione dei contenitori per lo smaltimento dei rifiuti condizionati in matrice cementizia a bassa o media attività, secondo la Guida Tecnica n.26 [31].

Gli internals costituiscono da sempre un grande problema per le attività di smantellamento in quanto la loro forma irregolare rende molto complessa la realizzazione un sistema di captazione degli sfridi. Lo spargimento nella piscina di segmentazione di questo materiale di risulta (costituito da particelle di metallo attivato) rappresenta una sorgente di irraggiamento e rende necessarie continue interruzioni delle operazioni per il loro recupero e la purificazione dell'acqua della piscina. L'utilizzo in passato di metodi meccanici ha portato alla dilatazione dei tempi totali di smantellamento, infatti, per il solo taglio degli internals sono stati impiegati 16 mesi all'impianto Jose Cabrera, 30 mesi alla centrale di Stade e addirittura 61 mesi all'impianto di Wurgassen [32].

La green-land ha affrontato questo problema ideando la macchina SCAB[®] (Cap.7.4), costituita da un banco di taglio che sfrutta la tecnologia AWJ all'interno di una scatola metallica che impedisce la dispersione delle particelle nella piscina nella quale è immersa. La SCAB[®] è poi collegata ad una macchina ASM[®] che garantisce l'aspirazione e la separazione del materiale attivo. Al termine di ogni ciclo di taglio, la macchina è dotata di un sistema di auto-decontaminazione mediante getti d'acqua ad alta velocità, sempre eseguita prima della sua apertura.

Tradizionalmente il taglio dei tubi di guida delle barre di controllo ha portato a contaminazione nella piscina di segmentazione in quanto questi venivano sezionati mediante metodo meccanico. Il processo Hurricane prevede invece l'impiego di una macchina in fase di sviluppo che sfrutta il taglio a catena senza produzione di sfridi.

Il taglio AWJ permette, a differenza degli altri metodi, anche l'erosione di una superficie. Questa particolarità è stata usata da **green-land** per risolvere due problemi:

- L'erosione delle viti di fissaggio dei baffle, per le quali, dopo decine di anni immerse in acqua, è da prendere in esame il fatto che possano essere diventate impossibili da svitare per molteplici ragioni. Si è quindi pensato di utilizzare il getto d'acqua con abrasivo e catcher per erodere la testa delle viti e liberare il componente serrato. Così facendo, strutture complesse possono essere smontate fino ad ottenere elementi semplici, facili da maneggiare e da sezionare.
- 2. La predisposizione della presa con speciali pinze per la movimentazione di elementi segmentati di grande peso, quali i tegoli risultanti dalla segmentazione del vessel. In questo caso l'utilizzo del getto d'acqua con abrasivo e catcher permette di realizzare sulle due facce del tegolo un incavo per la presa delle pinze, riducendo al massimo la possibilità di slittamento.

Per ridurre i tempi delle operazioni di taglio dei grandi spessori, in particolare del vessel, il processo Hurricane prevede l'impiego per la prima volta di due getti d'acqua con catcher contrapposti, in questo modo la velocità di taglio aumenterebbe più che linearmente. Con l'incremento di questa e con il contenimento della contaminazione, il processo garantisce la sua efficacia in termini di tempo necessario alla segmentazione.

Il risvolto immediato dell'impiego del processo Hurricane è la drastica riduzione dei tempi complessivi di decommissioning e quindi dei costi operativi. Si consideri infatti che i maggiori investimenti nella tecnologia e nell'automazione potranno essere ripartiti attraverso il riutilizzo, per quanto possibile, delle macchine impiegate in successive operazioni.

Capitolo 4

Il taglio ad acqua e la tecnologia green-land

Dopo aver riportato lo stato dell'arte del decommissioning mondiale e della centrale di Trino, è il caso di spiegare nel dettaglio la metodologia di taglio adottata da **green**land. Successivamente verrà analizzata la tecnologia sviluppata al fine di arginare alcuni inconvenienti della metodologia di taglio stessa.

4.1 Il taglio ad acqua - la teoria

Il taglio ad acqua è una metodologia di taglio che prevede l'utilizzo di acqua ad altissima velocità (e quindi elevata energia cinetica) per asportare il materiale e permettere il sezionamento del pezzo. Per far sì che l'acqua raggiunga una velocità sufficiente da poter tagliare il materiale selezionato, questa viene compressa ad un'elevata (*ultra*) pressione e successivamente viene fatta passare attraverso un *orifizio*, ovvero un foro molto piccolo che trasforma l'energia di pressione del fluido in energia cinetica (Cap.4.1.2).

La forza dell'acqua non è però sufficiente a tagliare i materiali più duri e spessi, per raggiungere questo obiettivo, da una tramoggia viene aggiunta al getto di taglio una quantità di polvere abrasiva. Questa viene accelerata dall'acqua e così facendo i grani dell'abrasivo erodono in maniera molto più efficiente il materiale. Quello appena descritto è il così detto taglio ad acqua con abrasivo o AWJC (Abrasive WaterJet Cutting).



Figura 4.1: Schema di una testa di taglio AWJ [33]

In Fig.4.1 è schematizzata una testa di taglio media con i relativi componenti e i principali parametri che ne influenzano il funzionamento. In generale però il taglio ad acqua con e senza abrasivo è preferito rispetto alle tecniche meccaniche principalmente per l'assenza di stress residui e fenomeni di indurimento locale nel materiale dovuti ad alte temperature. Alcune caratteristiche del taglio ad acqua sono mostrate in Fig.4.2, in generale, rispetto ad altre metodologie non meccaniche come laser e plasma, il taglio ad acqua non produce gas tossici ed è applicabile alla quasi totalità di materiali, come ad esempio metalli, ceramica, vetro, pietra ed addirittura molti alimenti [34].

Il taglio ad acqua viene già impiegato in innumerevoli ambiti¹ anche per i pregi sopra elencati, ma ha ancora poco riscontro in ambito nucleare come verrà spiegato nel paragrafo successivo al Cap.4.1.3. **green-land** ha preferito questa tecnologia rispetto al taglio meccanico seguendo il principio ALARA applicato alle dosi assorbite dal personale operativo. Gli utensili delle frese e le lame delle seghe a nastro vanno infatti sostituiti di frequente esponendo quindi gli operatori addetti alle radiazioni. Mentre il taglio laser non è capace di sezionare pezzi di grandi spessori, quello al plasma presenta un ottima capacità in tal senso. Il suo impiego è però stato scartato a causa dei fumi tossici che, in caso di materiale attivo, si porterebbero con loro atomi attivati di difficile captazione dato lo stato gassoso del mezzo.

¹Un elenco abbastanza lungo e completo è riportato in [34]

	O Waterjet	Laser	Plasma
		Cutting process	
Multi-head applications possible	00000	00000	0000
Multilayer cutting	00000	0000	0000
Material distortion	00000	00000	0000
Material hardening	00000	00000	00000
Feathering	00000	00000	00000
Rework effort	0000	00000	$\bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \circ$
Toxic vapour formation	00000	0000	00000
Material loss	Very low	Very low	Low
Tolerances	0.1 – 0.3 mm	0.1 mm	0.2 – 0.5 mm
Max. material thickness	300 mm	— < 60 mm	— < 160 mm

Figura 4.2: Confronto tra taglio ad acqua, laser e al plasma [34]

Per capire appieno come questa tecnologia possa essere capace di tagliare la parete del vessel di Trino spesso 219 mm, è necessario esplorare almeno tre dei principali parametri di funzionamento del taglio ad acqua proposti in Fig.4.1, i quali dovranno essere ottimizzati a seguito di prove sperimentali. Viene quindi riportata una descrizione dei parametri funzionale allo scopo di questo lavoro, per un ulteriore approfondimento, la lettura di [35] è consigliata.

4.1.1 La pressione di esercizio

La pressione di lavoro del getto d'acqua è senza dubbio il parametro che più incide sulla capacità di taglio del sistema. Nonostante si possa trovare qualche applicazione più di nicchia, la quasi totalità delle macchine in commercio per il taglio ad acqua lavora ad ultra pressioni che vanno dai 400 ai 600 *MPa*. Nonostante questi due valori abbastanza vicini tra loro, tagliare ad una o all'altra pressione comporta una differenza radicale nella struttura della pompa.



Figura 4.3: Schemi delle pompe: a) ad azionamento diretto; b) ad intensificazione [36]

Per pressioni minori è sufficiente utilizzare una pompa ad azionamento diretto o *rotary* direct drive pump la cui struttura è mostrata in Fig.4.3a. Questa è costituita da un pistone che comprime l'aria, messo in movimento da un sistema biella-manovella, azionato da un motore elettrico. I vantaggi di questa pompa sono il basso consto iniziale, l'affidabilità e l'efficienza, purtroppo però ha elevati costi di manutenzione e la sua pressione di mandata è limitata.

L'altra categoria di pompe per ultra pressioni è quella ad intensificazione. In Fig.4.3b è mostrata la versione ad attuazione idraulica, in cui l'olio viene compresso da una pompa standard a qualche decina di MPa e poi mediante un pistone a stantuffi di superficie diversa, la pressione dalla parte dell'acqua viene "intensificata" quanto necessario. Queste pompe hanno il difetto di avere basse efficienze ma sono le uniche a garantire le pressioni più elevate e con maggior stabilità.

A scopo di completezza è interessante riportare l'esistenza sul mercato di una fetta crescente di intensificatori ad attuazione diretta e non più idraulica. La ditta costruttrice [37] afferma di avere performance rivoluzionarie che però in questo studio non verranno analizzate o discusse. Si lascia quindi al lettore la possibilità di approfondire l'argomento. Per quanto riguarda la scelta del tipo di pompa è necessario evidenziare la differenza di pareri che arrivano dai diversi costruttori, interessati a vendere il loro prodotto di un tipo
rispetto all'altro.

4.1.2 L'orifizio

Per capire l'importanza della pressione nel taglio ad acqua si introduce il concetto di *orifizio*, ovvero un restringimento del condotto attraverso il quale scorre un liquido. Questo orifizio (Fig.4.1) serve per convertire l'energia di pressione dell'acqua in energia cinetica. Nelle applicazioni ad ultra pressioni questo è realizzato in diamante sintetico, motivo per cui viene spesso chiamato *jewel*. Per capirne il meccanismo, si considera un fluido non viscoso, incomprimibile e in regime stazionario e si può quindi scrivere l'equazione di Bernoulli (già nota però ad Eulero) che correla velocità e pressioni a monte e a valle dell'orifizio:

$$\frac{1}{2}\rho v_{in}^2 + \rho g y_{in} + p_{in} = \frac{1}{2}\rho v_{out}^2 + \rho g y_{out} + p_{out}$$
(4.1)

dove ρ è la densità del liquido, v la velocità, g l'accelerazione di gravità, y l'altezza relativa del punto medio della sezione del condotto e p la pressione. Applicando le opportune semplificazioni:

- 1. Differenza di altezze trascurabile: $\rho gy_{in} \sim \rho gy_{out}$
- 2. Velocità iniziale trascurabile: Si considera un tubo di diametro molto maggiore rispetto all'orifizio
- 3. Pressione a valle trascurabile: si considerano i valori di pressione di mandata della pompa mostrati al Cap.4.1.1 e il fatto che l'orifizio in analisi scarichi nell'ambiente a pressione atmosferica, quindi $p_{out} < 1\% p_{in}$

Si ottiene quindi:

$$v_{out} = \sqrt{\frac{2p_{in}}{\rho}} \tag{4.2}$$

Questo risultato mostra l'importanza della pressione nel produrre un getto ad elevata velocità e quindi in grado di tagliare con maggior efficienza. Questa equazione rappresenta però un caso ideale e data l'elevata pressione di lavoro, l'acqua non può assolutamente essere considerata incomprimibile. In questo viene in aiuto la trattazione di [33], il quale impiega il coefficiente C_{da} (coefficiente globale di scarico) per quantificare la distanza del caso reale da quello ideale. Questo viene definito come rapporto tra la portata volumetrica reale e quella ideale calcolata con l'Eq.4.2 ed è calcolato sperimentalmente.

$$C_{da} = \frac{Q_{re}}{A\sqrt{\frac{2p_{in}}{\rho_{out}}}} \tag{4.3}$$

dove Q è la portata volumetrica e la densità è riferita alle condizioni di scarico, ovvero a pressione ambiente. Questo coefficiente è la chiave di volta per il dimensionamento dell'orifizio e quindi per il raggiungimento di determinate performance di taglio, infatti lo stesso Hashish ha riportato in più riprese valori di C_{da} calcolati in condizioni diverse (si veda [33], [38] e [39]).

Si è provato a comparare questi risultati ad applicazioni reali ma senza successo. I motivi del fallimento sono le incognite sui rendimenti delle pompe ad ultra pressione a cui i costruttori non danno libero accesso, ma soprattutto le condizioni sperimentali prima citate. La macchina utilizzata per la comparazione lavora a pressione di circa 590 MPa e con un orifizio di 0, 254 mm, mentre le prove di Hashsih sono state eseguite o con pressioni inferiori [33], o con orifizi di diametro diverso [38], oppure in condizioni non chiare [39]. Tutte queste incertezze non hanno permesso di arrivare ad un risultato soddisfacente.

Si vuole infine sottolineare che è sempre sconsigliato utilizzare grandi orifizi e basse pressioni per tagliare materiale. È senz'altro vero che con diametri maggiori del foro aumenta la portata e quindi di conseguenza cresce l'energia totale del fluido e la quantità di materiale rimosso, in parallelo devono però aumentare la potenza della pompa e la portata di abrasivo necessaria. In caso di applicazioni spartane questa è una soluzione percorribile, ma nel caso in cui l'efficienza di taglio fosse importante, la miglior soluzione sarebbe sempre quella di aumentare per quanto possibile la pressione di esercizio.

4.1.3 L'abrasivo e il nozzle

Come detto precedentemente, mentre nel taglio ad acqua pura il fluido è responsabile dell'incisione, nel taglio AWJ è l'abrasivo che principalmente asporta il materiale, da qui l'importanza della sua selezione per garantire la massima efficienza nella lavorazione.



Figura 4.4: Schema dell'asportazione di materiale da parte di una particella di abrasivo tonda o squadrata [40]

I parametri per la selezione del materiale abrasivo sono molteplici:

- *Durezza* come facilmente intuibile, materiali più duri sono in grado di asportare più materiale senza alterare la loro forma (e quindi dissipare la loro energia).
- *Densità* materiali più densi sono più difficili da accelerare mediante il getto ma portano più energia al sito del taglio (maggiore efficienza).
- *Forma* questo è il parametro più interessante. Come mostra la Fig.4.4, particelle squadrate e dai margini taglienti sono in grado di asportare più materiale rispetto ad altre con i bordi smussati.
- *Costo* Spesso trascurato in ambito accademico, in ambiente industriale è sicuramente un parametro al pari (spesso più importante) degli altri. Data l'enorme pressione in gioco e la grande energia di impatto delle particelle, queste, durante l'utilizzo vengono frantumate e diventano poi inutilizzabili, da qui un'importanza ancora maggiore del costo.

Svariati sono i materiali utilizzabili come abrasivo, [35] ne riporta dodici divisi tra: vetrosi, di origine naturale, allumina/carburi e metalli. Il compromesso migliore tra tutte caratteristiche sembra essere rappresentato dal granato o garnet, materiale di origine naturale (formula chimica $X_3Y_2(SiO_4)_3$ con X, Y vari metalli [41]), il cui maggior distributore è la GMA Garnet Pty Ltd. È stato stimato che il 90% degli utilizzatori di abrasivo faccia uso di polvere di granato, nonostante in altri studi sia stato trovato che l'utilizzo di corindone aumenti la velocità di taglio del 20% [35].

Durante il taglio è però necessario dosare la quantità di abrasivo immessa poiché oltre una certa soglia l'efficacia non aumenta ulteriormente. Questo fenomeno è dato dalle particelle che, trovandosi in numero eccessivo, non riescono a venir accelerate tutte dal getto d'acqua.

L'azione di mescolamento delle particelle con l'acqua ha luogo nell'*ugello* o nozzle, un tubo di materiale molto duro (materialo ceramico tipo SiC) ed estremamente resistente all'usura data dallo sfregamento dell'abrasivo. L'ugello viene anche chiamato focalizzatore, in quanto il suo scopo è anche quello di permettere al getto di concentrarsi (per quanto possibile) in un'area limitata. Diametro e lunghezza dell'ugello sono parametri molto importanti da regolare per avere un taglio ottimizzato, seppur non fondamentali come la pressione e l'orifizio. In genere, una regola non scritta dice che il diametro dell'ugello debba essere circa tre volte il diametro dell'orifizio.

Nonostante gli innumerevoli vantaggi della tecnologia, il taglio ad acqua con abrasivo, non è molto usato nel settore nucleare a causa della produzione di acqua di scarto contenente particelle di materiale attivo. La dimensione di questi corpuscoli è talmente ridotta da creare una sospensione altamente torbida simile ad un fango, la cui separazione è molto complessa. Ad esempio, durante il decommissioning della centrale di Maine Yankee questo problema è apparso dal principio [42] e i tentativi iniziali di utilizzo di sistemi di filtraggio convenzionali non sono andati a buon fine (Fig.4.5).



Figura 4.5: Sistema filtrante convenzionale intasato (colore marrone) utilizzato nel decommissioning della centrale Maine Yankee [42]

4.2 Il catcher e la macchina ASM[®]

green-land ha deciso di affrontare il problema presentato nel paragrafo precedente, brevettando un sistema di captazione (*catcher*) e separazione (*macchina* $ASM^{\textcircled{R}}$) del materiale di risulta dal taglio AWJ. Questi oggetti andranno aggiunti alle macchine AWJC.

4.2.1 Il catcher

La prima innovazione che presenta il processo **green-land** è il catcher, ovvero un sistema di captazione del materiale di risulta del taglio AWJ. A questo strumento è applicata una depressione che permette l'aspirazione dei residui e di una quantità di acqua dall'ambiente circostante per evitare la dispersione del pulviscolo.



Figura 4.6: Disegno del sistema catcher proposto da green-land

Il sistema di catcher schematizzato in Fig.4.6 è diviso in due unità denominate *catcher* superiore e catcher inferiore. Il primo è molto semplice e serve per aspirare i residui creati dal getto nel momento in cui questo non dovesse essere passante, ovvero all'inizio del taglio o durante altre operazioni particolari (Cap.6.2.3). Il catcher inferiore è invece quello più complesso ed importante, in quanto deve captare il getto direttamente, il quale nonostante la dissipazione di energia con il pezzo, potrebbe essere ancora abbastanza potente da compromettere la resistenza ad usura di materiali comuni. Proprio per questo motivo, esso verrà realizzato in acciaio balistico armour ad altissima resistenza.



Figura 4.7: Disegno del catcher inferiore e dettagli dei flussi d'acqua (verde - AWJ)

In Fig.4.7 è possibile capirne meglio il funzionamento. Dell'acqua "pulita" viene mandata al catcher (da sinistra), la quale scorre e porta con sè il materiale di risulta che arriva insieme al getto (dall'alto). A destra è applicata la depressione da una pompa (non raffigurata in queste figure), la portata conseguente dev'essere maggiore della somma tra la portata del getto e quella di acqua pulita, la differenza è aspirata dalla luce presente tra il catcher stesso e il pezzo. Questo liquido aspirato viene mandato all'altra novità introdotta da **green-lond**, la macchina ASM[®].

All'inizio e alla conclusione del taglio si può intuire come il contenimento del materiale di risulta non sia assicurato. Per ovviare a questo problema verrà eseguita una campagna di prove per determinare la quantità di materiale che effettivamente viene disperso in queste fasi. È stata però già ideata una soluzione al problema che consiste nell'impiego di elementi dallo spessore e dalla forma analoghi al componente tagliato, i quali vengono posizionati sul pezzo prima del taglio. Questi elementi vengono forati dal getto ed il taglio viene iniziato al loro interno per poi procedere normalmente e concludersi di nuovo nell'elemento introdotto. Il risultato sarà quindi la "simulazione" di un prolungamento del componente da sezionare, permettendo al catcher di avere continua adesione.

4.2.2 La macchina ASM[®]

Questa macchina in fase di sviluppo serve per aspirare il materiale di risulta dai catcher, separare la parte solida dal liquido e infine mandare l'acqua pulita al trattamento. Parte di quest'acqua viene riciclata e rimandata all'interno del catcher per garantire la pulizia del materiale come mostrato nel paragrafo precedente. Successivamente, una volta riempito il contenitore della macchina, questo viene poi cementato e smaltito. La macchina prende il nome dalle tre funzioni che deve svolgere: Aspirazione, Separazione e Mescolamento. La necessità di realizzare una macchina siffatta invece di utilizzare sistemi di filtraggio tradizionali risiede nel fatto che le cartucce derivanti da questo metodo sarebbero troppo numerose, problematica che in qualsiasi altro campo non sarebbe eccessivamente limitante. In ambiente nucleare invece il rifiuto, specialmente quello attivo, dev'essere smaltito seguendo procedure particolari, complicate e quindi costose.



Figura 4.8: Schema della macchina ASM[®]

Per aspirare, la macchina utilizza delle pompe, in Fig.4.8 ne è mostrata una sola, ma attualmente è in fase di sviluppo un aggiornamento della macchina nella quale ne verranno impiegate tre. Due pompe più piccole garantiscono l'aspirazione da ognuno dei due catcher e mandano il liquido al separatore, mentre la terza permette di garantire la portata stabilita aspirando l'acqua pulita dal separatore e mandandola al trattamento. La regolazione di tre pompe distinte dev'essere effettuata finemente, ma ha il vantaggio di mantenere il separatore in pressione invece che in depressione, impedendo l'ingresso di aria nel circuito. Così facendo, l'aspirazione è sempre garantita e si evita di contaminare la piscina di lavoro in caso di malfunzionamento della pompa a valle del separatore o del separatore stesso.

Per separare, la macchina utilizza un sistema di pale che mette in rotazione il liquido e genera campo di velocità centrifugo che permette alle particelle di andare verso l'esterno a velocità più o meno elevate in base alla loro densità. Aspirando il liquido dall'alto e vicino all'asse, fa si che non vengano intercettate tutte le particelle che sono migrate verso l'esterno a causa della rotazione, ottenendo un liquido "pulito" a valle della macchina.

Come mostrato in Fig.4.9, la particella da separare è soggetta ad una forza verso l'esterno ed una verso l'interno. Si ipotizza che l'accelerazione seppur fisicamente presente, sia esigua e che quindi il moto del corpo sia un susseguirsi di stati di equilibri meccanici. Dal continuo stato di equilibrio si può derivare una equazione del moto della particella che, sebbene fisicamente errata, approssima estremamente bene il moto della particella. Ad ogni buon conto è stata eseguita una verifica tenendo conto dell'accelerazione e si è trovato per una particella di ferro (osservazione conservativa) di diametro 1 μm un errore del 3 % sul tempo di migrazione. Una seconda ipotesi fatta è quella di trascurare il boundary layer esterno per il calcolo del tempo di migrazione lungo la traiettoria di spostamento della particella. Quest'ipotesi (esatta nel caso di una centrifuga) è razionale in quanto la dimensione dello strato limite è dell'ordine di qualche millimetro conto le decine di centimetri del campo di moto (errore < 1%).

Per poter creare un modello analitico semplice e con il fine di dare solamente l'ordine di grandezza del tempo di migrazione, si deve utilizzare la forte ipotesi di regime laminare. Quest'ipotesi non realistica permette di utilizzare la formula di Stokes per la forza di attrito in quanto le equazioni per il moto turbolento hanno complessità che esulano dalla finalità di questo modello e di questo studio. Secondariamente, si considera un campo solamente centrifugo, ovvero senza la presenza di vortici secondari. Di nuovo, come per il punto precedente, quest'ipotesi assicura semplicità al modello, in caso contrario sarebbe necessario lo sviluppo di una complessa simulazione CFD, lontana dagli obiettivi di questo studio.



Figura 4.9: Sezione del separatore e forze a cui è sottoposta una particella generica da separare

Con le ipotesi fatte, si può quindi asserire che sulla particella agisca una forza centrifuga come in Fig.4.9, dove m è la massa, ω la velocità di rotazione in rad/s ed R la distanza radiale della particella dal centro. Facendo l'ipotesi semplificativa di particelle omogenee di forma sferica e considerando la spinta di Archimede, la forza diventa:

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_a) \implies F_c = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_a)\omega^2 R \tag{4.4}$$

dove ρ_p è la densità della particella e ρ_a quella dell'acqua. Verso l'interno invece la particella subisce la forza di resistenza al moto generata dallo spostamento in un fluido viscoso, esprimibile attraverso la formula di Stokes mostrata in Fig.4.9, dove μ è la viscosità dell'acqua e v la velocità lineare della particella. Quest'ultima quantità, all'interno di un moto centrifugo, è esprimibile come dR/dt risultando in:

$$F_s = 6\pi\mu r \frac{dR}{dt} \tag{4.5}$$

In condizioni di moto stazionario si eguagliano le forze, si risolve l'equazione differenziale ed, esplicitando il tempo di migrazione della particella, si ottiene:

$$t = \frac{18\mu}{d^2\omega^2(\rho_p - \rho_a)} ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$
(4.6)

dove d è il diametro della particella e $R_{1/2}$ rappresentano le distanze della particella dal centro, rispettivamente all'inizio dello spostamento ed alla fine. Considerando il volume del contenitore fisso, si può calcolare una portata volumetrica critica di liquido entrante tale per cui le particelle hanno il tempo sufficiente per venir separate, questo è uguale al tempo di migrazione calcolato all'Eq.4.6. Questa portata è semplicemente uguale al rapporto tra il volume e il tempo di migrazione:

$$Q_{crit} = \frac{V}{t} \tag{4.7}$$

Questo valore è fondamentale perché, insieme al numero di giri, determina la possibilità della macchina ASM[®] di separare le particelle di specifici diametri e densità: portate eccessive o velocità di rotazione insufficienti non permettono alla macchina di separare il materiale. Viste le ipotesi fortemente semplificative, questo valore è usato come ordine di grandezza per impostare le prove sperimentali, saranno queste a fornire un valore reale di portata critica della macchina.

Conclusa la fase di taglio dove sono servite le funzioni di aspirazione e separazione, la macchina ASM[®] verrà trasferita alla waste management facility (Cap.5.4) per lo smaltimento del contenuto, ovvero materiale attivo di risulta dal taglio. Per fare ciò, **green-land** propone una procedura ben collaudata con altri contenitori ed altre sostanze, usata anche da Sogin S.p.A. da molti anni. La girante viene collegata ad un motore mediante un sistema di trasmissione avente una frizione tarata, quindi le pale vengono fatte ruotare rapidamente in un senso e nell'altro, in modo da rimettere in sospensione il materiale. A questo punto, mantenendo il moto alternato, viene introdotta nel contenitore una quantità ben precisa di malta di particolare composizione che tenderà lentamente a fare presa. Non appena il miscuglio diventa troppo viscoso per permettere alle polveri di sedimentarsi in zone localizzate, la frizione slitterà e il motore verrà quindi scollegato. Il manufatto quasi completamente solido è ora pronto per essere stoccato temporaneamente nel sito fino al suo posizionamento definitivo nel deposito nazionale. Il volume del contenitore della macchina $ASM^{\textcircled{R}}$ è di 550 *l* ed ha dimensioni specifiche, corrispondenti a quelle standard per i manufatti da inserire nel deposito.

Capitolo 5

Preparazione dell'impianto

Prima di elencare le attività e i macchinari da predisporre prima dell'inizio del decommissioning vero e proprio, è fondamentale dettagliare l'edificio all'interno del quale queste attività avranno luogo: l'*Edificio Reattore* (ER). Questa struttura di cemento armato e acciaio ha lo scopo di contenere il circuito primario e mantenerlo isolato dall'ambiente esterno in caso di emergenza, al fine di evitare o ridurre eventuali perdite radiologiche. Le dimensioni dell'edificio sono importanti, il diametro interno è di 30,5 m e l'altezza è di 57,9 m, si consideri però che la struttura prosegue anche nel sottosuolo.



Figura 5.1: Sezione est-ovest dell'edificio reattore con indicazione delle aree specifiche [43]

All'interno dell'ER vengono identificati alcuni punti d'interesse evidenziati in Fig.5.1. Ad una distanza di circa 14 m dall'estremità superiore, si trova un carroponte dalla portata di 120 ton in grado di muoversi con coordinate polari, da cui il nome gru polare, fondamentale per le attività di smantellamento.

A circa 13 *m* più in basso, si trova un'area molto ampia, quasi quanto l'edificio reattore, nella quale vengono posizionati alcuni macchinari e/o attrezzature operative, da cui il nome *Piano Di Governo* (PDG). A questo livello si trova anche l'ingresso principale dei materiali e del personale nell'ER, dalle dimensioni di 2,44 \times 2,59 *m*. 8 *m* sotto si trova il *piano di lavoro*, un'area, al contrario dell'altra, molto angusta, di superficie limitata e di difficile accesso (Attraverso scale metalliche molto ripide). Questa zona funge da collegamento tra il PDG e la *piscina* e su quest'area appoggerà la macchina principale del processo Hurricane (macchina DACH[®] - Cap.7.2).

Con il termine generale "piscina", viene indicata la grande vasca che va dalla zona dove giace il vessel alla piscina di stoccaggio temporaneo del combustibile o *piscina di taglio*. Il nome deriva dal fatto che durante le operazioni, questo volume sarà riempito d'acqua. All'interno della piscina di taglio, come facilmente intuibile, avverranno poi le fasi principali di segmentazione. Con cavità del reattore si indica la zona più profonda della piscina, all'interno della quale è attualmente posizionato il vessel.

5.1 Attività preliminari

Prima di iniziare qualunque attività è necessario verificare il corretto funzionamento di tutti i sistemi e le apparecchiature che interverranno direttamente o indirettamente nella procedura di decommissioning.

In questo senso, uno dei sistemi più importanti vista la volumetria di acqua in gioco, è sicuramente il sistema di purificazione, la cui funzione è di catturare tutte le impurezze dalle acque di tutte le parti dell'impianto. Questo è costituito da cinque demineralizzatori con diverse funzioni ma dal principio analogo, ovvero utilizzare un filtro composto da resine a scambio ionico per eliminare le particelle in sospensione. Per la funzione deborante vengono impiegate resine Rohm & Haas XE-78 (OH), mentre per la purificazione dell'acqua della cavità del reattore si utilizzano resine Rohm & Haas XE-149 (K-OH) ed infine le resine Rohm & Haas XE-150 (H-OH) per il deposito del combustibile. La funzionalità di questo sistema è fondamentale per garantire la depurazione dell'acqua dove avverranno le operazioni di taglio in quanto è responsabile del filtraggio delle particelle più fini non separate dalla macchina ASM[®].

Un'apparecchiatura fondamentale al processo e alla sua preparazione è la gru polare descritta all'inizio del capitolo. La sua funzionalità deve essere ristabilita al 100% in conformità con la norma NUREG-0554 [44] con la quale è stata validata. L'affidabilità dev'essere garantita durante l'intera attività effettuando in periodi selezionati la manutenzione ordinaria. Per garantire il raggiungimento di tutte le aree interessate al processo, la lunghezza del cavo metallico della gru dev'essere almeno di 40 m.



Figura 5.2: Foto della piscina di Trino scattata dall'alto del reattore [45]

Una volta verificata la funzionalità dei sistemi necessari, si procederà allo svuotamento dei locali interessati dal decommissioning. Come si vede dalla Fig.5.2 ci sono alcune apparecchiature rimaste in piscina da precedenti attività, così come ce ne sono sul piano di governo. Visti gli spazi necessari al processo all'interno dell'edificio reattore, è fondamentale, prima di iniziare con l'allestimento delle macchine, rimuovere le attrezzature inutilizzate. Anche per questi materiali è necessario il passaggio attraverso la waste management facility (Cap.5.4) in quanto non è da escludersi a priori la presenza di contaminazione.

Si continua la fase di verifica preliminare dell'impianto affrontando il problema strutturale. Visti i grandi pesi in gioco durante le attività, è necessario, una volta ricevuti dalla società che gestisce l'impianto i dettagli specifici delle strutture, eseguire una verifica della resistenza al carico statico delle aree dell'ER interessate. Tutto l'edificio è realizzato in cemento armato ad alta resistenza, ma, non essendo stata prevista a priori questa procedura di decommissioning, la tenuta della struttura alle sollecitazioni potrebbe non essere garantita e il procedimento andrebbe adattato di conseguenza. Si ricorda ad ogni modo che durante le normali operazioni di refuelling del reattore, la testa del vessel (> 50 ton) veniva smontata ed appoggiata sul piano di governo sopra ad uno specifico supporto.

Prima di iniziare le operazioni effettive di smantellamento, è inoltre necessario analizzare attentamente eventuali oggetti contenenti boro che sono stati soggetti a flusso neutronico, in quanto potrebbero contenere tracce importanti di trizio. Solitamente questo isotopo è presente in grandi quantità nelle barre di controllo [46], le quali, come riportato nel Cap.3.2, non sono più presenti. Ad ogni modo, visto il pericolo associato alla volatilità del trizio, è necessario effettuare un'analisi dettagliata cominciando dal sistema di demineralizzazione, usato appunto per la rimozione dell'acido borico dal fluido primario.

Il progetto Hurricane non prevede la creazione di nessun struttura aggiuntiva a parte la waste management facility, necessaria in qualunque operazione di decommissioning. In fase d'opera potrebbe però essere possibile che per cause di forza maggiore sia necessaria la costruzione di edifici ausiliari. Considerando che ci si trova in ambito nucleare, oltre al tempo tecnico per la realizzazione vera e propria della struttura, è necessario un iter burocratico molto lungo, problematica riscontrata anche in [46]. Per questo motivo, insieme alla diffidenza da parte della popolazione, è fortemente sconsigliata la costruzione di edifici nuovi oltre a quelli preesistenti.

5.2 Allestimento piano di governo

L'allestimento del PDG inizia con la realizzazione di una cabina di comando dalla quale verranno dirette le operazione più delicate che avranno luogo nell'intero ER. Questa struttura non deve soddisfare particolari esigenze in termini strutturali e radioprotezionistici in quanto non verrà caricata con grandi pesi o esposta a radiazioni. Verrà realizzata accanto all'ingresso principale (Fig.5.7) in modo da permettere un'eventuale rapida evacuazione del personale, senza però ostruire le movimentazioni di materiale sul PDG.

La movimentazione di carichi "leggeri", in parallelo all'utilizzo gru polare di grande portata, rende necessaria l'aggiunta di un carroponte nel piano di governo. Si prevede un carico massimo inferiore alle 20 ton, taglia selezionata del macchinario, il quale verrebbe posizionato sopra la piscina. Come mostrato in Fig.5.3, questo dovrebbe muoversi da est ad ovest (da destra a sinistra in Fig.5.1) e si occuperebbe della movimentazione del materiale dalla piscina al PDG. Questa caratteristica lo rende una delle chiavi di volta nella gestione logistica dell'attività e l'ottimizzazione delle sue operazioni sarà fondamentale nel contenimento dei tempi morti conseguenti alle attività di taglio.



Figura 5.3: Spaccato dell'ER con ipotetico posizionamento del carroponte (non in scala) [6] e [47]

Successivamente, viene montata la parte riguardante il taglio dei componenti poco attivi che occuperà una grande porzione dello spazio a disposizione, come mostrato in Fig.5.7. Si inizia con la realizzazione parziale di una tenda di contenimento, ad esempio della Lancs Industries [48] o analoghe, simile a quella utilizzata nel decommissioning dell'impianto di Chooz A (Fig.5.4). Prima della chiusura della tenda, al suo interno viene collocata la macchina per il taglio dei componenti non attivi descritta nel Cap.7.1. Ultimato il montaggio della macchina, si posizionerà al suo interno, durante le operazioni di decommissioning, il pezzo non attivo da tagliare e successivamente potrà essere possibile chiudere la tenda. I componenti da segmentare sono introdotti all'interno della tenda mediante la gru polare da 60 ton; le parti segmentate verranno successivamente mandate alla waste management facility mediante piattaforme mobili descritte più avanti nel capitolo. Questo spezzamento delle operazioni di montaggio della tenda dev'essere fatto per permettere al prodotto finale di avere perfetta tenuta, l'unico collegamento con l'esterno durante le operazioni di segmentazione sarà infatti il sistema di ventilazione apposito.



Figura 5.4: Tenda di contenimento per bassa radioattività usata a Chooz A [49]

Lo spostamento dei carichi leggeri dalla piscina al PDG viene effettuato mediante il carroponte (Fig.5.3), i quali, nel caso di componenti molto attivi, devono assolutamente essere schermati in qualche modo. La soluzione proposta da **green-land** prevede l'impiego di speciali contenitori temporanei altamente schermati chiamati *shuttle* (Fig.5.5), i quali vengono riempiti con il componente attivo, chiusi e poi facilmente agganciati al carroponte per essere trasferiti alla waste management facility. Qui i materiali verranno inseriti negli appositi contenitori a geometria parallelepipeda (SBoX[®] o CP-5.2) per il loro successivo condizionamento, deposito temporaneo e definitivo.

È stato scelto di impiegare tre shuttle durante le operazioni in modo da permettere un ciclo di lavoro il più possibile costante e senza interruzioni, tenendo però presente che una delle fasi operative costituirà il collo di bottiglia dell'intero processo. Utilizzando tre contenitori è possibile far assorbire parzialmente al sistema il ritardo, permettendo all'operazione più lenta di lavorare senza le interruzioni causate dall'attesa del contenitore in fase di spostamento.



Figura 5.5: Schema dello shuttle per la movimentazione di componenti attivi [5]

Per la movimentazione dello shuttle o dei pezzi non attivi segmentati dal piano di governo fino alla waste management facility, è stata prevista una piattaforma mobile simile a quella raffigurata in Fig.5.6. Questa tipologia di attrezzatura è in grado di sollevare carichi enormi, fino a 200 ton [50], ma per questa applicazione la portata necessaria è di circa un decimo, mentre l'affidabilità è senz'altro la caratteristica principale ricercata. Successivamente, un ulteriore parametro da contenere è senza dubbio la dimensione, infatti, come si vede dalla Fig.5.7, gli spazi sono sfruttati al meglio e le apparecchiature ingombranti devono essere limiate allo stretto necessario. In generale il problema degli spazi sembra essere tipico anche di altre attività simili, come si vede ad esempio per il decommissioning dell'impianto di Chooz A in Fig.5.4.



Figura 5.6: Piattaforma mobile per lo spostamento dello shuttle [50]

Prima ancora di essere posizionato sulla piattaforma però, lo shuttle dev'essere decontaminato preliminarmente. Questa operazione serve ad escludere la contaminazione dell'edificio reattore dovuta alla possibilità di contaminazione superficiale, depositata sullo shuttle dopo la permanenza nella piscina di taglio. Quest'operazione avviene all'interno di una cella specifica, realizzata sul PDG al confine con l'apertura della piscina (Fig.5.7) e che utilizza acqua sotto pressione (decontaminazione fisica). L'acqua utilizzata viene poi raccolta e inviata, previa filtrazione, all'impianto di purificazione acqua del circuito primario del reattore.



Figura 5.7: Pianta dell'edificio reattore con indicazione delle aree necessarie al decommissioning [13] - modificato

5.3 Allestimento della piscina

La piscina è il luogo dove avvengono le operazioni di taglio del materiale attivo sotto battente d'acqua, per questa ragione, tutta l'attrezzatura che entra e/o opera in questo ambiente dev'essere progettata per resistere all'acqua. Una caratteristica fondamentale della piscina è il rivestimento di acciaio inox o *liner*, il quale ne permette l'impermeabilità. Prima delle operazioni di preparazione, questo dovrà essere accuratamente ispezionato per scongiurare la possibilità di perdite dovute ad aperture, causate da fenomeni corrosivi o di assestamento strutturale dopo l'appoggio di carichi pesanti.



Figura 5.8: Isolamento con profili in gomma per paratoia anti-inondazione [51]

Per iniziare l'allestimento, si posizionano le paratoie che dividono la piscina di taglio e la cavità del reattore, le quali fungeranno in futuro da isolamento della contaminazione e permetteranno il suo contenimento in un'area limitata. In Fig.5.8 è rappresentato un sistema ad uso civile dove la gomma funge da isolante, in campo nucleare invece questo sistema verrà sostituito da una guarnizione gonfiabile per garantire una tenuta maggiore. Un'ulteriore accortezza in fase operativa sarà mantenere in piscina il livello dell'acqua della parte pulita (ovest) leggermente maggiore rispetto al lato in cui avvengono le operazioni di taglio (est) in modo da creare una sovrappressione che impedirebbe alla contaminazione di diffondersi ulteriormente.

Dopo aver posizionato le paratoie divisorie, si procede con il montaggio di un braccio robotico (simile a quello raffigurato in Fig.5.9) sul gradino a sud della piscina di taglio, come mostrato in Fig.5.10. Per questo macchinario non è richiesta una precisione decimillimetrica come quelli utilizzati in ambito industriale, è fondamentale invece che la portata arrivi fino a 3 ton, ovvero il peso massimo di una delle parti tagliate dal vessel. Parallelamente il suo funzionamento remotizzato dev'essere garantito anche all'interno del campo di radiazioni γ . Il posizionamento e l'attivazione di questo braccio può successivamente agevolare anche le altre attività preparatorie, nelle quali può essere impiegato, permettendone anche la verifica funzionale per le successive attività.



Figura 5.9: Braccio robotizzato per lo spostamento dei pezzi tagliati [52]

Successivamente si posiziona nella piscina di taglio la *culla*. Questo componente è costituito da un supporto ad "U" all'interno del quale verranno poi posizionati (in fasi diverse) il vessel e gli internals. La sua funzione è quella di mantenere questi elementi stabilmente in posizione verticale al fine di permetterne il taglio, per questo motivo verrà equipaggiata con un sistema pneumatico di pistoni che ne serrano saldamente il contenuto ed in parallelo sarà dotata di martinetti per il recupero della verticalità nel caso di necessità. Un'altra funzione fondamentale è quella di distribuire il peso dei componenti su una superficie ampia, evitando così la perforazione del liner metallico e della base della piscina.

Procedendo con le operazioni si prepara la macchina $ASM^{\textcircled{R}}$ e la si posiziona sul gradino a sud della piscina di taglio assieme al sistema di filtraggio preliminare. Questo componente è stato previsto come ulteriore sicurezza nella catena di purificazione dell'acqua della piscina durante le operazioni di taglio. La macchina $ASM^{\textcircled{R}}$ invece sarà fondamentale durante le attività.

Il passo successivo sarà posizionare la macchina SCAB[®], nominata al Cap.3.4 e descritta in dettaglio al Cap.7.4, seguendo il principio di aggiungere gradualmente i macchinari partendo dal meno ingombrante, in modo da non ostacolare le altre operazioni preparatorie. L'ubicazione della macchina è studiata in modo da:

- Permetterne sempre l'apertura in condizioni operative;
- Ostacolare il minimo possibile le altre operazioni ed i movimenti;
- Ridurre al minimo la distanza tra il pezzo da tagliare e la macchina;
- Permettere al braccio robotico di posizionarvi comodamente all'interno i componenti.

Alla macchina dovrà infine venir collegata l'unità ASM[®] in modo da essere pronta per la segmentazione degli internals che precederà quella del vessel (Cap.6.2).



Figura 5.10: Pianta della piscina di taglio con allestimento per la segmentazione degli internals

La preparazione al fine delle operazioni di sezionatura viene ultimata con il posizionamento delle altre macchine di taglio, ovvero la macchina DACH[®] o AWJC principale (Cap.7.2) e la macchina TSM[®] per il taglio dei tubi (Cap.7.3).

5.4 La waste management facility

Il progetto di decommissioning di un reattore nucleare non sarebbe fattibile senza la realizzazione della *Waste Management Facility* (WMF), una struttura che riceve i rifiuti prodotti dal taglio, li caratterizza, li dispone con precisione nei contenitori finali e li condiziona. Dopo i previsti controlli radiometrici e di contaminazione superficiale, i contenitori riempiti vengono trasferiti al deposito temporaneo sul sito della centrale, prima dell'invio al deposito nazionale, non appena disponibile. Parallelamente, i materiali non attivi (attivazione inferiore ad 1 Bq/g), dopo la loro caratterizzazione, verranno inviati in fonderia. In caso di estesa contaminazione dei suddetti componenti, nella WMF è prevista una unità di decontaminazione chimica, predisposta per i materiali in acciaio inox. Qualunque precisazione sulla struttura della WMF può essere trovato all'interno della tesi [5].

Tutte le funzioni sopra citate vengono svolte dalla WMF, una struttura esterna all'ER e realizzata ad hoc prima dell'inizio delle attività di decommissioning. Un possibile layout è stato già proposto all'inizio del secolo da Brusa et al [53] nel cui progetto prevalgono la complessità operazionale e strutturale al fine di limitare i rischi.



Figura 5.11: Pianta della WMF prevista [5]

La Fig.5.11 mostra la WMF proposta da **green-land** nella quale si possono distinguere due percorsi distinti, uno per i materiali non attivi ed uno per quelli attivati. Entrambi questi percorsi iniziano però con un'area (1) all'interno della quale il pezzo viene caratterizzato per definirne l'esatto percorso.

Nel caso in cui il componente segmentato risulti avere un'attivazione inferiore ad 1 Bq/g, secondo la normativa italiana, questo può essere mandato in fonderia e rientrare nella normale filiera produttiva dell'acciaio. Preventivamente dev'essere però rimossa chimicamente la contaminazione superficiale presente sulle superfici difficili da raggiungere con i getti d'acqua. All'interno della sezione (2) viene effettuata la procedura di decontaminazione chimica e, una volta ultimata, il pezzo, dopo i previsti controlli radiometrici, può essere caricato all'interno di un container nella stazione successiva (3) e quindi spedito.



Figura 5.12: Schema della cella di trasferimento dei materiali attivi nel contenitore finale

Se però il materiale da smaltire risulta attivato oltre la soglia limite, questo viene mandato alla cella di trasferimento (4) raffigurata in Fig.5.12. All'interno di quest'area schermata, lo shuttle viene aperto ed il suo contenuto viene stoccato temporaneamente oppure viene caricato all'interno del contenitore finale nella sua posizione definitiva. Non appena il contenitore sarà pieno, verrà chiuso e potrà procedere lungo la WMF verso la zona (5). In quest'area, se necessario, il contenitore viene cementato (Fig.5.13) per rispettare la regolamentazione del deposito nazionale, ed infine spedito.



Figura 5.13: Schema di principio della fase di cementazione di un rifiuto nucleare [54]

Alla fine di ognuna delle due strade dei rifiuti è presente, come detto, una stazione di misura dell'attività sulla parete esterna dei contenitori al fine di garantire il rispetto delle normative.

La posizione della WMF è stata accuratamente selezionata riducendo al minimo il tragitto dei materiali attivi e l'impatto sulla struttura preesistente. A queste si aggiungono, come immaginabile, l'ottimizzazione in termini di facilità di realizzazione, costi e logistica. È stato quindi deciso di assemblare la struttura accanto all'ER, al quale è collegato mediante un passaggio da realizzare a nord-est ad altezza del suolo. Per far arrivare i materiali dal PDG al piano terra, verrà ricavato a nord-est un foro nel pavimento del piano di governo stesso, attraverso il quale lo shuttle verrà calato tramite la gru polare.

Capitolo 6

Le fasi del processo green-land

Di seguito verrà presentata la procedura innovativa per il decommissioning del vessel e degli internals elaborata da **green-land**. Le operazioni di segmentazione seguono l'ordine mostrato in Fig.6.1: si comincia dalla testa del vessel, successivamente si passa agli internals ed infine si seziona la parte restante, ovvero il contenitore cilindrico.



Figura 6.1: Sezione del vessel con suddivisione delle fasi di taglio [11]

6.1 Smantellamento della testa del vessel

L'inizio effettivo delle operazioni di smantellamento si ha con la rimozione del liner del vessel. Questo componente, visibile in Fig.5.2, consiste in una lamina di acciaio inox ad anello di colore chiaro che circonda la flangia del vessel ed isola la parte superiore della piscina dalla cavità del reattore. Prima di riempire la piscina d'acqua, vista la quasi inattività della testa e del liner, quest'ultimo viene rimosso da un operatore mediante taglio meccanico. Come tutti i rifiuti prodotti all'interno dell'ER, questo verrà poi trasportato alla WMF per i controlli e l'indirizzamento in fonderia.

Si prosegue l'esposizione del vessel con lo smontaggio della parte superiore dell'NST in modo da scoprire i tubi di primario. Lo schermo neutronico che in Fig.2.3 è rappresentato come un intero, è in realtà scomponibile; le fasi da seguire sono infatti quelle opposte al suo montaggio. Non appena i tubi sono stati superiormente esposti, di questi ne viene segmentata una sezione, in modo da svincolare il vessel, il quale rimarrà appoggiato solamente attraverso i suoi otto sostegni. Questo taglio dovrà essere eseguito il più vicino possibile al contenitore cilindrico in modo da agevolare le operazioni successive.

Una volta rimosse queste parti inattive, le quali non richiedono la schermatura del battente d'acqua, si procede con l'allagamento della piscina, per il quale saranno necessari circa 1700 m^3 d'acqua demineralizzata.

Il passo successivo è svitare le quarantadue viti che serrano la testa al contenitore cilindrico, le quali vengono normalmente strette prima meccanicamente e poi termicamente per garantire maggior efficacia del fissaggio. Quest'operazione non viene dettagliata in quanto, come il passo che verrà successivamente esposto, rappresenta una delle procedure che venivano eseguite normalmente durante le operazioni di refuelling, le quali sono già schematizzate, collaudate ed i macchinari necessari sono già presenti in loco.



Figura 6.2: Renderizzazione dello smontaggio della testa del vessel [43]

Liberata dai vincoli, la testa viene agganciata dalla gru polare come mostrato in Fig.6.2 e trasportata al piano di governo. Come già descritto al Cap.5.2, questa viene adagiata sulla macchina di taglio per i componenti non attivi (Cap.7.1) all'interno della tenda di contenimento, la quale viene successivamente chiusa e ventilata.

All'interno della tenda, la macchina esegue il taglio della testa e la sua sezionatura in sotto-unità dalla dimensione ottimizzata per la cella di decontaminazione. Ad oggi, con la cella di decontaminazione siffatta, si è calcolato che i tagli da fare debbano essere sette per produrre sedici pezzi. Questi, ad operazione complessiva ultimata, verrebbero trasportati alla WMF per la caratterizzazione, la decontaminazione della superficie interna, ed infine l'invio in fonderia. Le operazioni di design della cella di decontaminazione sono continue, non è quindi remota la possibilità che in futuro si decida di modificare lo schema di taglio della testa.

6.2 Smantellamento degli internals

Dopo la rimozione della testa, il vessel rimane aperto ed espone, sempre sotto battente d'acqua, gli internals. Questi elementi hanno rappresentato per molti processi di decommissioning uno scoglio [32], principalmente a causa della loro forma molto irregolare. Nel caso della metodologia di taglio scelta, la difficoltà nella sezionatura di questi componenti sta nell'impossibilità di far aderire in molti casi i catcher ad entrambe le superfici, portando quindi alla quasi certezza di produrre contaminazione in piscina. Per ovviare a questo problema sono state introdotte le macchine $TSM^{\textcircled{R}}$ per il taglio dei tubi (Cap.7.3) e SCAB^{\textcircled{R}} (Cap.7.4) per il taglio delle piastre e di alcuni componenti irregolari, sviluppate ad hoc.

Per gli spessori in gioco in questo capitolo (max 38 mm) verrà eseguita una prova sperimentale di taglio, ove verranno determinate le velocità di segmentazione. Si sottolinea però che, differentemente dal vessel che rappresenta un caso limite, pezzi di queste dimensioni vengono tagliati mediante tecnologia AWJ senza alcuna difficoltà, rappresentando un caso standard per le applicazioni industriali. La velocità di taglio dovrebbe essere all'incirca di 105 mm/min con una sola testa, contro i 15 mm/min nel caso del vessel con l'impiego di due ugelli.

6.2.1 Upper package e dummies

Il primo componente a venir affrontato sarà l'upper package in quanto è l'elemento più esterno degli internals. La sua rimozione è prevista ogni qual volta debba essere sostituito il combustibile del reattore, quindi i macchinari per la sua movimentazione e la procedura di spostamento sono, come per la testa del vessel, presenti in loco e ben collaudati. Questa strumentazione è quindi collegata al carroponte e successivamente viene agganciato l'UP, il quale viene poi sfilato (Fig.6.3) e posizionato sopra la macchina SCAB[®] mantenendo in tensione il cavo.



Figura 6.3: Renderizzazione delle operazioni di prelevamento e spostamento dell'UP [43]

La macchina SCAB[®] funge da basamento di supporto mentre il braccio robotico al quale è attaccata la macchina per il taglio dei tubi (Cap.7.3) inizia a sezionare i tubi di guida delle barre in due sezioni, eseguendo tre tagli per tubo come mostrato in Fig.6.4. Lo stessa macchina è dotata del sistema di presa che aggancia il semitubo e lo trasferisce nello shuttle, predisposto alla sua ricezione mediante una piastra forata (si veda [5]). Questa struttura è in grado di ospitare sette pezzi, dopo i quali l'intero shuttle dev'essere trasportato alla WMF e sostituito da un'altra unità vuota per poter continuare le operazioni.



Figura 6.4: a) Sezione del vessel con internals [17]; b) Schema di taglio dell'UP [14]

Dopo aver eseguito l'ultimo taglio, le due piastre si saranno separate. La piastra superiore inattiva (top support plate), ancora collegata al carroponte, verrà sollevata fino al PDG e adagiata su una piattaforma mobile per poi essere trasferita al taglio dei materiali non attivi. La piastra inferiore (upper core plate) invece è già posizionata nella macchina SCAB[®], la quale verrà chiusa ed attivata. La piastra superiore verrà sezionata in quattro parti mediante due tagli, mentre la piastra inferiore sarà divisa in sei parti con tre tagli. Il tempo stimato per questo blocco di operazioni è di cinque settimane

Gli elementi successivi da smantellare sono i dummies (Cap.2.2), i quali sono stati introdotti per diminuire il flusso neutronico uscente dal nocciolo. Per le operazioni di decommissioning si è deciso di sfruttare il corridoio di trasferimento del combustibile (Fig.6.5b) che collega la piscina di taglio con il deposito del combustibile accanto all'ER.



Figura 6.5: a) Disegno di un dummy; b) pianta dell'ER con indicazione del condotto di trasferimento del combustibile [17]

Vista la forma molto irregolare degli elementi e la loro grande attività (Tab.2.1), si è deciso di trasferirli tutti all'interno di un singolo contenitore Mosaik 80T e mandarli al deposito senza effettuare ulteriori manipolazioni.



Figura 6.6: Renderizzazione delle operazioni di spostamento dei dummies [43]

Come mostrato in Fig.6.6, con il carroponte si preleva un elemento finto, lo si posiziona all'interno del canale di trasferimento precedentemente descritto e lo si sposta all'edificio del combustibile. Qui, mediante l'attrezzatura che veniva utilizzata normalmente per le assemblies, si trasferiscono i dummies al contenitore finale, si procederà poi alla caratterizzazione della dose al contatto per poi spedirlo al deposito. Il tempo stimato per questo blocco di operazioni è di quattro settimane.

6.2.2 Upper barrel

Senza l'UP che tappa il vessel e senza i dummies al suo interno, il lower package è ora libero di essere spostato. Questo componente è sicuramente il più affascinante dell'intera procedura. In primo luogo la sua forma renderà necessario l'impiego di tutte le macchine **green-land**. Secondariamente, possiede un grande range di attività specifica lungo la sua struttura, la quale passa da quasi zero alle estremità a $2,07 \times 10^7 Bq/g$ nella lower core plate.

Inizialmente, l'intero LP viene spostato all'interno della culla mediante la gru polare (Fig.6.7). L'altezza del livello d'acqua non è però sufficiente per mantenere coperto tutto il lower package e durante il trasferimento ci sarà una sporgenza di circa un metro. Questa non rappresenta un problema in quanto la parte superiore dell'upper barrel (estremità superiore dell'LP) non è attiva. La compatibilità dell'LP e della culla è data in primo luogo dal fatto che il lower package ha alla base la stessa forma del vessel, in secondo luogo dagli accorgimenti che verranno adoperati nella realizzazione della culla.



Figura 6.7: Renderizzazione delle operazioni di spostamento dell'LP [43]

Dopo il posizionamento dell'LP nella culla, si inserisce la macchina di taglio principale con doppio catcher all'interno dell'upper barrel e si procede con il taglio della flangia all'estremità superiore, la quale fungeva da appoggio nel vessel (Fig.6.8b). Questa parte dell'LP si trova alla stessa altezza della flangia del vessel e della top support plate; è quindi ragionevole pensare che si tratti di un componente non attivo. Questa verrà trasportata, analogamente alla grande piastra appena menzionata, al piano di governo, quindi al taglio di materiali non attivi, alla WMF ed infine in fonderia. La rimozione della flangia in testa è un'operazione necessaria in quanto la sua presenza ostacolerebbe ogni taglio verticale lungo l'estremità del barrel, impedendo l'adesione del catcher.

A questo punto, il componente di forma cilindrica risulta libero da impedimenti e si può iniziarne la sezionatura in tegoli, eseguita dalla macchina DACH[®] che segue lo schema di taglio schematizzato in Fig.6.8a. Si comincia da un taglio verticale partendo dall'alto e scendendo fino a metà barrel, qui la macchina procede orizzontalmente per circa $1,1 \ m$ e completa il taglio risalendo fino ad uscire. Il pezzo così creato viene chiamato tegolo per la forma che ricorda i tegoli romani dei tetti delle abitazioni. Il taglio prosegue quindi con il tegolo successivo seguendo la procedura appena descritta, cominciando però dal taglio orizzontale (Fig.6.8a). La virola sarà stata completata con l'ottavo tegolo, il quale sarà prodotto mediante un singolo taglio orizzontale. La macchina procederà quindi con la sezionatura della seconda virola in altri otto tegoli, avendo cura di passare attorno ai quattro fori presenti nel barrel.



Figura 6.8: Schema di taglio del barrel [8]

Ogni tegolo, dopo esser stato prodotto, viene agganciato dal braccio robotico e viene riposto all'interno dello shuttle precedentemente posizionato in piscina. Dopo aver caricato quattro tegoli, lo shuttle è pieno e viene trasportato sul PDG e quindi alla WMF per procedere con lo smaltimento dei pezzi. Vista la distanza della prima virola con il nocciolo, è ragionevole credere che anche questa potrà essere mandata in fonderia, ad ogni modo la decisione verrà presa seguendo la normativa vigente e soltanto dopo la caratterizzazione del materiale, per il quale non esistono ad oggi dati specifici a quell'altezza. Completate le prime due virole, la macchina è di fronte ad una situazione simile a quella iniziale con la flangia che bloccava l'aderenza del catcher nell'inizio e nella conclusione del taglio verticale. Si procede quindi alla segmentazione circonferenziale della flangia che serve al collegamento dell'upper con il lower barrel (serrati con ottanta bulloni). Questa volta il materiale è molto attivo e per questo motivo l'anello prodotto dev'essere trasportato con il braccio robotico dentro la macchina SCAB[®], la quale sezionerà il componente in sei segmenti. Questi verranno poi trasferiti allo shuttle per proseguire verso la WMF ed infine al deposito nazionale. Il tempo totale stimato per questo blocco di operazioni è di sette settimane.

6.2.3 Barrel-baffles

Con l'asportazione della flangia di collegamento dei barrel, la situazione potrebbe essere simile a quella precedente se non fosse per la presenza dei baffles, collegati al barrel mediante i formers. Questa struttura, descritta al Cap.2.2.2, rende necessaria una delle novità proposte da green-land, ovvero l'erosione della testa delle viti mediante getto ad acqua con abrasivo, sempre con continua aspirazione del materiale risultante dall'operazione.

Considerando il complesso barrel-formers-baffles simile¹ a quello in Fig.6.9, la testa di taglio della macchina AWJC principale DACH[®], utilizzando un solo getto d'acqua, compie un movimento rotatorio attorno alla testa della vite a velocità elevata. Dopo un numero di passaggi ben preciso, la testa della vite sarà stata completamente erosa e, ripetuto questo processo per tutte le viti di un baffle, questo sarà svincolato. La chiave della riuscita del processo, da determinare sperimentalmente prima delle operazioni, è trovare il numero esatto di passaggi e la velocità di avanzamento dell'ugello in modo da erodere solamente la vite e senza forare il complesso. Prove sperimentali di questa procedura sono state già eseguite ed hanno dato esito molto positivo.

 $^{^1 \}rm Nel$ caso di Trino, i baffles sono tutti grandi una o due volte la larghezza dell'elemento di combustibile (200mm)



Figura 6.9: Rappresentazione del collegamento baffles-formers-barrel [55]

Svincolato un baffle da tutte le viti, questo viene preso dal braccio robotico e trasportato all'interno della macchina SCAB[®]. Il processo viene ripetuto per altri quattordici baffles, dopodiché la macchina viene chiusa e i componenti vengono sezionati trasversalmente a metà. I pezzi ricavati verranno inseriti nello shuttle per venir mandati alla WMF. In totale sono presenti 24 baffle singoli e 12 baffle di larghezza doppia, il tempo stimato per questo blocco di operazioni è di nove settimane.

Una volta ultimata la fase precedente, rimarranno solamente i formers avvitati al barrel. La procedura precedentemente descritta verrà ripetuta per liberare questi elementi ad anello, i quali verranno poi segmentati in sei parti nella macchina SCAB[®] ed inviati alla WMF. Il tempo stimato per questa operazione è di cinque settimane.

La sezione riguardante il complesso barrel-baffle termina con la segmentazione del barrel rimasto senza elementi al suo interno che impediscono l'adesione del catcher alla superficie. Al pari dell'upper barrel e come mostrato in Fig.6.8b, il taglio avviene in due virole con otto tegoli ciascuna, con conseguente invio dei materiali di risulta alla WMF. Il tempo stimato per questa operazione è di due settimane.

6.2.4 Strutture inferiori

La rimanenza dell'LP dopo le fasi precedenti è costituita dalle strutture inferiori, ovvero lower core plate con supporti radiali, tubi guida inferiori e piastra di fusione o bottom support plate. Se si presta attenzione, la situazione è analoga a quella dell'UP (Cap.6.2.1), ovvero ci si trova a dover sezionare una piastra molto attiva, una inattiva e cinquantadue tubi (Fig.6.10). L'unica differenza sta nel fatto che il complesso è ribaltato rispetto al caso precedente che vedeva la piastra attivata verso il basso, quindi, per ovviare al problema, si è deciso di ruotare le strutture. La gru polare aggancia la lower core plate e solleva il complesso, con il carroponte (con l'aiuto del braccio robotico se necessario) si aggancia la piastra di fusione. A questo punto la gru cala la fune e il carroponte invece recupera la propria, permettendo alle strutture di ruotare.



Figura 6.10: a) Sezione del vessel con internals [17]; b) Indicazione per il taglio delle strutture inferiori [8]

Una volta portata nel verso corretto la gru polare sgancia la struttura e il carroponte la posiziona nella macchina SCAB[®] allo stesso modo dell'UP. La segmentazione del componente avverrà in maniera analoga e la durata totale sarà di cinque settimane.

Con questa parte si conclude lo smantellamento degli internals che in totale richiederebbe cinquantadue settimane, considerando anche i tempi di preparazione, i ritardi, i tempi morti ed eventuali contingenze (App.A). Se si considerano i tempi dichiarati di sessantuno mesi per la segmentazione degli internals del reattore tedesco di Wurgassen, si possono cogliere i vantaggi del processo proposto da **green-land**.

6.3 Smantellamento del contenitore cilindrico

Prima di procedere con il sezionamento del contenitore cilindrico, dalla piscina dev'essere rimossa la macchina SCAB[®], non è più necessaria data la regolarità della superficie del vessel. I tagli al contenitore cilindrico verranno eseguiti solamente con la macchina AWJC principale DACH[®] (Cap.7.2) in piscina e sul PDG con la macchina per componenti inattivi (Cap.7.1).

6.3.1 Prima e seconda virola

Un primo sottocapitolo è dedicato alle due prime virole, in quanto, secondo la tesi [11], avrebbero attivazione inferiore ad 1 Bq/g. Come già evidenziato, questo valore comporta lo smaltimento dell'acciaio attraverso la filiera standard, ovvero viene mandato in fonderia.

Con il vessel ancora nella posizione originale, si cala la macchina DACH[®] all'interno della flangia in modo che le teste di taglio contrapposte si trovino una all'esterno ed una all'interno del cilindro. Con la macchina in posizione si esegue un taglio circonferenziale ad 1,3 m dalla flangia, in modo da separare la prima virola. A seguito di alcune prove sperimentali effettuate, si stima una velocità di taglio (con buon margine di sicurezza) di circa 15 mm/min, così facendo, la separazione della prima virola dovrebbe richiedere all'incirca 12 ore.



Figura 6.11: Schema di taglio del vessel [17]
Una volta separata la prima virola, pesante circa 37 ton, si deve ricorrere alla gru polare per il suo spostamento verso la macchina di taglio per componenti non attivi, ubicata, come detto, nel PDG. Dopo il suo posizionamento, la tenda di contenimento, che ha già ultimato il taglio della testa ed è stata svuotata, viene ri-sigillata e si esegue la segmentazione della virola in otto tegoli uguali larghi circa 1,5 m. I pezzi così prodotti verranno a questo punto mandati verso la WMF per procedere poi con la decontaminazione e l'invio in fonderia.

Lo stesso procedimento è ripetuto per la seconda virola, ma in questo caso l'operazione è molto più delicata in quanto lo spazio tra i bocchelli e l'NST è molto limitato, ma sufficiente per il passaggio del braccio di taglio. Questa virola pesa circa 34 *ton* e, analogamente alla prima, viene sezionata in otto tegoli, i quali conterranno anche i bocchelli che verranno segmentati come indicato in [5].

6.3.2 Trasferimento del vessel

Rimosse le prime parti non attive del vessel, il resto della procedura sarà eseguito nella piscina di taglio attrezzata come indicato nel Cap.5.3. Ciò è necessario per evitare una possibile contaminazione delle pareti e del fondo della cavità del reattore, difficile poi da rimuovere. Si porrebbe inoltre il problema di sostenere il vessel una volta asportata la terza virola, la quale contiene gli otto supporti dello stesso (Cap.2.1).

A seguito della rimozione delle prime due virole, il peso del vessel si è ridotto a $190 - 37 - 34 = 119 \ ton$, peso che sarebbe già dentro i parametri di lavoro della gru polare. Questa infatti, secondo normativa Nureg-0554 [44], deve avere il 100% delle caratteristiche dinamiche trasportando il carico massimo previsto (120 ton). A questo peso però va tolta la spinta di Archimede in quanto lo spostamento è effettuato sotto il livello dell'acqua. Al netto di tutte le forze, la massa da sollevare e trasportare è di circa 103 ton.

Per permettere l'aggancio del vessel da parte della gru polare, viene utilizzata la macchina di taglio principale per effettuare quattro fori all'estremità superiore del cilindro. All'interno di questi, verranno agganciate le funi che permetteranno di sollevare il componente da sezionare



Figura 6.12: Renderizzazione del trasporto del vessel mediante gru polare [16]

Come mostrato in Fig.6.12, il vessel può ora venir agganciato e trasferito all'interno della culla nella piscina di taglio. Una volta messo in posizione, la struttura è dotata di un sistema di serraggio pneumatico che impedisce eventuali pericolosi movimenti di assestamento del vessel e permette un aggiustamento in posizione verticale.

6.3.3 Terza, quarta, quinta e sesta virola

Con il vessel posizionato come in Fig.6.13, è ora possibile procedere al taglio delle virole successive. La procedura è la medesima per tutte e quattro le sezioni, ma differisce dalle virole 1 e 2 in quanto non si effettua un taglio circonferenziale iniziale, ma i tegoli vengono ricavati uno ad uno come per l'upper barrel (Cap.6.2.2).



Figura 6.13: Vessel posizionato nella culla all'interno della piscina di taglio

Partendo dal vessel così come raffigurato in Fig.6.13, la macchina AWJC principale viene adagiata all'interno del cilindro ed inizia la lavorazione effettuando sui due lati del vessel otto erosioni parziali, in modo da ricavare un incavo che permetterà alle pinze di agganciare il tegolo e di non scivolare.

A questo punto la macchina effettua il primo taglio verticale dall'estremità superiore verso il basso, fermandosi dopo 1,3 m. Successivamente, la testa si muove orizzontalmente di 1,4 m per poi terminare con un taglio verticale uguale al primo. L'incavo ricavato in precedenza sarà all'interno della figura realizzata ed assialmente sulla mezzeria. I tagli dei tegoli successivi inizieranno dallo spigolo ricavato dalla mancanza del tegolo precedente, dove verrà eseguito prima un taglio orizzontale e poi uno verticale. Tutte quattro le virole vengono sezionate in questo modo, con l'unica differenza che l'ultima sarà alta 1,15 m in quanto si sarà arrivati al fondo bombato.

I tegoli ricavati, dal peso di circa 3 *ton*, vengono prelevati dal braccio robotico e man mano trasferiti all'interno dello shuttle. Questo, contenente un tegolo alla volta, viene trasferito al PDG mediante il carroponte e viene effettuato lo scambio con uno dei tre shuttle che è già stato svuotato. Il nuovo contenitore viene quindi calato all'interno della piscina mentre quello pieno va trasferito alla WMF. Considerando la velocità di taglio riportata al sottocapitolo precedente, il tempo di lavoro totale per questa sezione dovrebbe essere di circa 95 *ore*, mentre la durata media di un taglio di un tegolo richiede circa 3 *ore*.

6.3.4 Fondo bombato

La rimanenza del vessel è costituita dal fondo quasi emisferico posizionato all'interno della culla. Data la sua inattività, questo componente verrà sezionato utilizzando la macchina per componenti non attivi sul piano di governo. Per permetterne il trasporto, in questo componente vengono ricavati quattro fori mediante la macchina DACH[®] allo stesso modo del contenitore cilindrico al Cap.6.3.2.

L'emisfera può quindi venir agganciata dalla gru polare ed essere trasferita al PDG. La sezionatura sarà effettuata con un taglio orizzontale a metà altezza e con cinque tagli verticali, due per l'estremità tondeggiante e tre per la parte ad anello, come schematizzato in Fig.6.11.

Capitolo 7

Le macchine necessarie al decommissioning

Di seguito verranno descritte le specifiche tecniche generali delle quattro principali macchine che saranno utilizzate nel processo Hurricane. Le suddette macchine verranno realizzate in scala 1:1 e provate "a freddo" nello stabilimento della **green-land** a Castiglione delle Stiviere. Alla descrizione, vengono allegati disegni di massima delle stesse per renderne più chiaro il funzionamento.

La necessità di lavorare sott'acqua ed in ambiente contaminato da parte di queste macchine rende fondamentale l'utilizzo di materiali capaci di resistere all'azione ossidativa dell'acqua e ai metodi di decontaminazione. Una delle possibili strade è l'impiego di acciai inossidabili mentre l'altra soluzione è quella di impermeabilizzare le strutture mediante vernici speciali. Per assicurare l'approvazione dall'organo di controllo è necessario percorrere la prima strada, ma per i prototipi di prova, per ragioni economiche, i componenti verranno realizzati in materiali meno costosi e saranno verniciati con speciali vernici a tenuta, come ad esempio le Moist Metal Grip proposte dalla Superior Coatings Solutions [56].

Sia la macchina per il taglio dei componenti non attivi che la SCAB[®] appoggiano direttamente sulla struttura dell'ER (le altre due vengono "sorrette" da altre strutture) e per questo devono essere progettate per avere un'area di appoggio ampia ed il peso distribuito. Dev'essere inoltre garantita la resistenza della struttura portante al carico e, nel caso specifico della macchina SCAB[®], la sua base dev'essere studiata con cura per evitare il danneggiamento del liner d'acciaio che garantisce l'isolamento della piscina.

Un'altra caratteristica fondamentale delle macchine per il decommissioning è la dimensione. Come detto nel Cap.5, l'ingresso più ampio disponibile misura solamente $2,44 \times 2,59 \ m$ e tutti i macchinari dovranno entrare per quella via. Questa necessità di progetto non altera la funzionalità delle macchine ma comporta una progettazione più minuziosa che includa la possibilità di separazione dei componenti più ingombranti. L'ingrandimento dell'ingresso o la creazione di una nuova apertura (come fatto per estrarre il vessel intero dell'impianto Trojan dall'ER [57]) devono essere ritenute le ultime strade percorribili visti i tempi e le problematiche relative alla sicurezza

7.1 Taglio componenti non attivi

La prima macchina che si vuole dettagliare è quella per i componenti non attivi presente sul PDG. Le specifiche iniziali per questa parte del processo rendevano necessaria una macchina capace di tagliare spessori variabili, anche molto importanti (flangia di vessel e testa, 498 mm), ma soprattutto componenti di grandi dimensioni. Si ricorda infatti che la testa, componente più ostico, ha un diametro esterno di 3943 mm ed un'altezza di 2229 mm. L'unica riduzione di complessità rispetto alle altre tre macchine è costituita dal fatto che non sono necessarie schermature, visto la bassissima attivazione beta-gamma presente, mentre saranno opportune precauzioni di contenimento del materiale risultante dal taglio all'interno della tenda ventilata (Cap.5.2).

Dal principio, come per il taglio di materiali attivi, sono state scartate le tecniche di taglio che producono vapori¹ come l'ossitaglio. Questa scelta, in linea con l'obiettivo di **green-land** per le dosi al personale, avrebbero comportato la possibilità di trasporto della contaminazione attraverso i fumi prodotti. Questi, oltre a costituire un possibile pericolo per gli operatori, sono di difficile captazione e richiederebbero ulteriori precauzioni per il contenimento, anche nel caso di metodologie automatizzate come il taglio al plasma.

Considerato il knowhow di **green-land** sul processo di segmentazione mediante tecnica AWJC, si è valutata l'ipotesi di applicare anche alle parti considerate "non attive" questa tecnologia. Quest'ipotesi è stata scartata per due ragioni:

- Nelle fasi di taglio non passante, il metodo AWJC produce un forte aerosol con il rischio di contaminazione diffusa, non essendo presente il battente d'acqua con il sistema di catcher. La risoluzione di questo problema avrebbe comportato la realizzazione di una macchina simile alla SCAB[®], ritenuta non economicamente competitiva vista la bassa attività.
- Il limite principale alla tecnologia AWJC è la scarsa versatilità del taglio nel caso di forme complesse. In questo caso si dovrebbe effettuare uno zigzag tra i supporti delle barre di controllo della testa senza poter eseguire un taglio rettilineo, il tutto con uno spazio insufficiente.

 $^{^1{\}rm Tra}$ questi figura anche il taglio laser, non riportato nel testo principale perché non in grado di segmentare gli spessori in gioco



Figura 7.1: Macchina selezionata per il taglio di componenti non attivi [58]

Con questi requisiti, la scelta è caduta su una segatrice a nastro tradizionale. Questa metodologia consente il taglio di quasi qualunque spessore e larghezza, a patto di adeguare la velocità di movimento della lama. In aggiunta, questo è uno dei metodi di taglio dell'acciaio più diffusi a livello industriale, la tecnologia è quindi molto sviluppata e la conoscenza è ben strutturata.

La macchina selezionata, mostrata in Fig.7.1, è già sul mercato ed è prodotta dal gruppo SOITAAB. Questa macchina, senza alcuna modifica, permette il taglio di un componente largo fino a 3500 mm ed alto 2700 mm. È già stato preso contatto con la ditta produttrice, la quale ha confermato la possibilità di modifica della macchina per renderla adatta al taglio della testa e delle prime due virole. Un'altra ottima caratteristica della macchina è la possibilità di effettuare il taglio a qualunque inclinazione, in quanto i supporti della lama sono in grado di ruotare e renderne diagonale la pendenza, mentre il software CNC permette il movimento fluido dell'intero arco. La ditta produttrice ha inoltre già prodotto macchine per il decommissioning di impianti nucleari, conosce le problematiche del settore ed in passato le ha già superate, inclusa quella degli spazi di ingresso dei macchinari.

7.2 Taglio contenitori cilindrici

La macchina DACH[®] (Double Aspiration Cutting Head) o macchina AWJC principale è la macchina di taglio impiegata per la segmentazione di componenti cilindrici (nello specifico del barrel dell'LP e del contenitore cilindrico del vessel, e per l'erosione delle viti dei baffles. Con il nome DACH[®] si fa riferimento all'insieme delle attrezzature, costituito dalla struttura di taglio (Fig.7.2), dalla pompa (Fig.7.3b), dalla tramoggia dell'abrasivo (Fig.7.3a) e dal carrello di supporto e trasporto di questi elementi.



Figura 7.2: Schema di massima della macchina DACH[®]

In Fig.7.2 è rappresentato lo schema di massima della struttura di taglio che verrà realizzata. Come si vede, è dotata di un sistema di pistoni (verde) che permette il serraggio ed il centraggio della stessa con l'asse del vessel. In blu è rappresentato il telaio che collega e sorregge le varie parti, il quale dovrà essere molto robusto ed il più leggero possibile, al fine di diminuire gli sforzi gravanti sul carrello di sostegno. La movimentazione delle teste di taglio è data dalle guide colorate in azzurro o giallo, le prime responsabili dello spostamento verticale e le ultime di quello circonferenziale.

Il componente grigio è la staffa di supporto degli ugelli per i taglio ad acqua dotati di catcher (rosso). Questa, a differenza della struttura portante, non ha bisogno di resistenza estremamente elevata in quanto la spinta massima data dagli ugelli è di circa 10 kg, uno dei vantaggi del taglio ad acqua rispetto a quello meccanico. Al fine di effettuare un taglio adeguatamente preciso, sarà invece necessaria un'elevata rigidità della staffa



Figura 7.3: a) Tramoggia KMT per abrasivo [59]; b) Pompa KMT da 620 MPa e 93 kW per il taglio ad acqua [60]

La macchina, per il suo utilizzo, viene agganciata ad un carrello che corre su rotaie esterne alla piscina di taglio e che si muove in direzione est-ovest. Questo dispositivo dovrà essere realizzato in modo da ospitare la pompa ad ultra pressione (dimensioni di base: $1552 \times 1500 \ mm$) e la tramoggia dell'abrasivo (dimensioni di base: $1060 \times 1060 \ mm$) mostrati in Fig.7.3. Questi due elementi sono già studiati per poter essere collegati a due teste di taglio, con l'accortezza di utilizzare un orifizio dal diametro di 0,25 o 0,28 mm. I collegamenti tra l'esterno e la macchina verranno fatti con cavi ombelicali, ovvero cablaggi misti (elettrico-idraulici) inguainati assieme, si veda ad esempio il sistema proposto dalla Tratos [61], che garantisce tenuta, affidabilità e resistenza.

Durante la fase di progettazione della macchina verrà inoltre presa in considerazione la necessità di sostituzione di alcuni componenti in caso di rottura o usura. Queste operazioni dovranno essere eseguite rapidamente e semplicemente, in modo da limitare la possibile (seppur molto limitata) esposizione del personale alla radioattività data da contaminazione. La semplicità è invece un mantra dell'ambito nucleare, in quanto le operazioni semplici sono più facili da eseguire e quindi la possibilità di compiere errori si riduce; alle volte questo comporta anche minor tempo. Si vuole ad esempio menzionare la presenza del brevetto di un ugello [62] che possiede queste caratteristiche, permettendo la drastica riduzione dei tempi di sostituzione.

7.3 Taglio dei tubi

Il taglio dei tubi avverrà grazie alla macchina TSM[®] (Tube Shearing Machine) la quale ha come obiettivo l'esecuzione di un taglio circolare in uno spazio limitato senza produzione di sfridi (oppure con il loro contenimento). Questa limitazione degli spazi è data dalla distanza minima tra due tubi guida che arriva a circa 100 mm, visibile nel dettaglio in Fig.7.5b. Per poter garantire queste specifiche sono stati scartati tutti i metodi tradizionali presi in considerazione al capitolo precedente in quanto non erano in grado di garantire allo stesso tempo il contenimento degli sfridi o l'esecuzione dell'operazione in uno spazio limitato.



Figura 7.4: Schema di massima della macchina per il taglio dei tubi di guida

La soluzione trovata è stata quella del taglio a catena, già ampiamente adottato per la segmentazione di tubi in altri ambiti (idraulica, automotive ecc.). La macchina, schematizzata in Fig.7.4, fa correre una guida attorno al tubo portando con sè la catena a dischi, questa viene agganciata dall'altro lato della testa ed il sistema inizia a tirare grazie all'utilizzo di un attuatore idraulico. La forza di serraggio della catena, unita ad un leggero scorrimento alternato del sistema, permette ai dischi di affondare nel tubo spesso circa 10 mm e reciderlo senza produrre sfridi.



Figura 7.5: Disegni con dettagli della macchina per il taglio dei tubi di guida - schema elementi del nocciolo con raffigurazione delle barre preso da [17]

Oltre alla funzione di taglio, questa testa prevede anche un sistema di pinze per la presa del semitubo segmentato (Fig.7.5c), così facendo non è necessario l'impiego di un altro macchinario separato per svolgere questa funzione. Vista la limitatezza degli spazi, l'impiego di un ulteriore braccio per la manipolazione sarebbe di difficile attuazione. L'intera testa di taglio e presa verrebbe maneggiata dal braccio robotico il quale è già stato predisposto in piscina per le attività di movimentazione successive.

7.4 Taglio delle piastre e componenti irregolari

La macchina SCAB[®] (Submerged Cutting Aspirated Box), già introdotta in precedenza e schematizzata in Fig.7.6, permette il taglio delle piastre e componenti irregolari senza contaminare la piscina principale. Nell'insieme è costituita da una macchina AWJC tradizionale avente delle accortezze che ne permettono l'inscatolamento all'interno di un contenitore di acciaio inossidabile. Al fondo della macchina viene collegato il circuito ASM[®] che aspira l'acqua sporca risultante dal taglio e ne separa le particelle di abrasivo e acciaio.



Figura 7.6: Disegno macchina SCAB[®] per il taglio degli internals con contenimento

La cupola di chiusura della macchina garantisce la tenuta attraverso delle guarnizioni, in questo modo l'interno contaminato e l'esterno rimangono separati durante tutta la fase del taglio. Così facendo è possibile eseguire le operazioni di segmentazione a secco lasciando solamente uno strato d'acqua sul fondo per attutire la forza del getto (come nelle macchine AWJC tradizionali). Un collegamento verso l'esterno è previsto sulla cima della cupola in modo da permettere il controllo della ventilazione.

Una caratteristica fondamentale della macchina è la presenza al suo interno di ugelli per la decontaminazione fisica mediante acqua ad alta pressione. Al fine di impedire alle particelle attive di raggiungere la piscina, è previsto un sistema interno di lavaggio della contaminazione che viene mandata alla macchina ASM[®].

Per contenere gli spazi all'interno della piscina, si sta valutando la realizzazione della macchina in coordinate polari, in modo che questa abbia la forma del componente più ingombrante (top support plate) ed evitare spazi inutilizzati. Così facendo sarà necessario adattare la parte della procedura relativa alla segmentazione dei baffles, i quali potrebbero venir sovrapposti uno sull'altro per ottimizzare la carica della macchina.

Capitolo 8

Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è quello di presentare un processo completo per lo smantellamento del vessel e degli internals del reattore di Trino Vercellese che permetta, con modifiche minime, l'applicazione più generale ad altri reattori ad acqua leggera. Per arrivare al processo Hurricane, inizialmente sono stati analizzati nel dettaglio i disegni dei componenti da smantellare forniti da Sogin S.p.A., ed in parallelo è stato raccolto il maggior numero di informazioni mancanti riguardo la struttura dell'impianto. La tecnica di segmentazione è invece stata proposta dal principio da **green-lond**, la quale è stata migliorata con l'introduzione del doppio taglio contrapposto ed il sistema di catcher.

Con questo bagaglio è stata elaborata una procedura che, tenendo conto della metodologia di taglio, aveva come obiettivi la riduzione di: dosi al personale, tempi, costi e rifiuti da inviare al deposito nazionale. Il primo obiettivo è stato raggiunto con l'automazione e la remotizzazione della quasi totalità delle operazioni e con il contenimento del materiale attivo prima che venga disperso nella piscina di taglio. La riduzione dei tempi, e quindi dei costi operativi, sarà possibile con la nuova procedura per la segmentazione degli internals che richiederà solamente un anno, molto meno tempo di altri casi fallimentari che ne hanno richiesti fino a cinque. È utile ricordare in questo senso che minor tempo di lavoro effettivo vuol dire anche minor dose al personale (a parità di condizioni). I costi delle macchine, che per questioni di segreto industriale delle aziende del settore sono impossibili da confrontare con quelle proposte, verranno ammortizzati dal riutilizzo delle stesse, in quanto le parti soggette ad usura sono molto limitate. Infine, mediante il processo di decontaminazione chimica superficiale (non oggetto di questa tesi) sarà possibile mandare una parte dei materiali prodotti in fonderia convenzionale, senza questa manipolazione l'attività data da contaminazione avrebbe portato alla necessità di smaltire questi come rifiuti a bassa attività.

È importante sottolineare che il processo non è stato applicato e non ci sono quindi le verifiche sperimentali a sostegno dell'incremento delle performance rispetto ai metodi tradizionali, i cui dettagli non sono però noti a causa del segreto industriale. Le basi su cui appoggia il processo **green-land** sono l'esperienza operativa negli impianti del ciclo del combustibile nucleare, nella realizzazione di macchine operatrici e l'analisi della struttura e dei componenti da smantellare. Sono già state eseguite prove sperimentali della macchina ASM[®] e del catcher con continui miglioramenti, le quali non sono state presentate per evitare divagazioni rispetto alla presentazione del processo.

Per quanto riguarda alcuni aspetti che non sono stati approfonditi in questa tesi, quali la disposizione e la caratterizzazione dei rifiuti, si suggerisce la lettura della tesi della dott.ssa F. Crivelli [5], responsabile di questa parte del processo. La fase di decontaminazione chimica è invece affidata all'ing. M. Corrado il quale segue un percorso di dottorato su questo tema. Sono però già in corso alcune prove sperimentali presso il Politecnico di Torino.

I prossimi mesi saranno fondamentali per lo sviluppo del processo Hurricane, in quanto sarà necessario concludere le prove della macchina ASM[®] ed affidare ad uno o più studi di ingegneria lo sviluppo delle macchine delineate al Cap.7, per le quali saranno necessari i test di funzionalità. Quando le macchine verranno complete e testate, sarà necessario eseguire le prove "a freddo" (senza elementi attivi) delle vere e proprie fasi del processo in modo da ricevere l'approvazione delle autorità competenti (ISIN [63]).

Elenco delle figure

1.1	Fotografia esterna dell'impianto di Trino V. [6]	9
1.2	Sezione di un reattore nucleare con rappresentazione del flusso del refrigerante	
	primario [9] e [10]	10
2.1	Rappresentazione dell'impianto elettronucleare di Trino Vercellese $[12]$	12
2.2	a) Disegno 3D del vessel [15] b) Dimensioni del vessel [14] c) Composizione del	
	vessel [14]	14
2.3	Sezione del reattore con dettaglio del NST e suo disegno 3D [16]	15
2.4	Disegno 3D dell'upper package del reattore [15] $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	16
2.5	Disegno 3D degli internals del reattore Chooz A [8]	17
2.6	Disegno 3D dell'upper barrel del reattore [14] \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	18
2.7	Disegni 3D dei a) baffles [18] e del b) barrel [14] \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	18
2.8	Rappresentazione delle strutture inferiori interne al RPV [8] \ldots \ldots \ldots	19
2.9	Raffigurazione circuito primario dell'impianto di Trino V. [21] \ldots	21
3.1	Confronto dei costi delle tre strade di decommissioning [22]	23
3.2	Divisione dei costi associati al decommissioning [22] $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	24
3.3	Fasi e tempistiche del decommissioning delle centrali italiane [24] \ldots	25
3.4	Turbina a bassa pressione del circuito secondario dell'impianto Enrico Fermi [27]	26
3.5	Fasi e tempistiche del decommissioning della centrale di Trino $[6]$ \ldots \ldots \ldots	26
3.6	Metodologie di taglio tradizionali impiegate all'impianto di Zorita: a) sega a	
	nastro [29] b) sega a disco [8]	28
3.7	Dettaglio dei trucioli prodotti dalla segmentazione mediante sega a nastro $\left[8\right]$	28
4.1	Schema di una testa di taglio AWJ [33]	33
4.2	Confronto tra taglio ad acqua, laser e al plasma [34] \ldots \ldots \ldots \ldots	34
4.3	Schemi delle pompe: a) ad azionamento diretto; b) ad intensificazione $[36]$	35
4.4	Schema dell'asportazione di materiale da parte di una particella di abrasivo tonda	
	o squadrata [40] \ldots	38
4.5	Sistema filtrante convenzionale intasato (colore marrone) utilizzato nel decom-	
	missioning della centrale Maine Yankee [42]	40
4.6	Disegno del sistema catcher proposto da green-land	41

4.7	Disegno del catcher inferiore e dettagli dei flussi d'acqua (verde - AWJ) $\ . \ . \ .$	42
4.8	Schema della macchina $\mathrm{ASM}^{\widehat{\mathbb{R}}}$	43
4.9	Sezione del separatore e forze a cui è sottoposta una particella generica da separare	44
5.1	Sezione est-ovest dell'edificio reattore con indicazione delle aree specifiche $\left[43 ight]$.	47
5.2	Foto della piscina di Trino scattata dall'alto del reattore [45]	49
5.3	Spaccato dell'ER con ipotetico posizionamento del carroponte (non in scala) [6]	
	e [47]	51
5.4	Tenda di contenimento per bassa radioattività usata a Chooz A $[49]$	52
5.5	Schema dello shuttle per la movimentazione di componenti attivi $[5]$	53
5.6	Piattaforma mobile per lo spostamento dello shuttle $[50]$	53
5.7	Pianta dell'edificio reattore con indicazione delle aree necessarie al decommissio-	
	ning $[13]$ - modificato	54
5.8	Isolamento con profili in gomma per paratoia anti-inondazione [51] \ldots .	55
5.9	Braccio robotizzato per lo spostamento dei pezzi tagliati [52] $\ldots \ldots \ldots$	56
5.10	Pianta della piscina di taglio con allestimento per la segmentazione degli internals	57
5.11	Pianta della WMF prevista [5]	58
5.12	Schema della cella di trasferimento dei materiali attivi nel contenitore finale . $\ .$	58
5.13	Schema di principio della fase di cementazione di un rifiuto nucleare [54] \ldots	59
6.1	Sezione del vessel con suddivisione delle fasi di taglio [11]	60
6.2	Renderizzazione dello smontaggio della testa del vessel [43] $\ldots \ldots \ldots \ldots$	62
6.3	Renderizzazione delle operazioni di prelevamento e spostamento dell'UP $\left[43\right]$	63
6.4	a) Sezione del vessel con internals [17]; b) Schema di taglio dell'UP [14] \ldots	64
6.5	a) Disegno di un dummy; b) pianta dell'ER con indicazione del condotto di	
	trasferimento del combustibile [17] \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	65
6.6	Renderizzazione delle operazioni di spostamento dei dummies [43] \ldots \ldots	65
6.7	Renderizzazione delle operazioni di spostamento dell'LP [43]	66
6.8	Schema di taglio del barrel [8] \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	67
6.9	Rappresentazione del collegamento baffles-formers-barrel [55] $\ldots \ldots \ldots$	69
6.10	a) Sezione del vessel con internals [17]; b) Indicazione per il taglio delle strutture	
	inferiori [8]	70
6.11	Schema di taglio del vessel [17] \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	71
6.12	Renderizzazione del trasporto del vessel mediante gru polare $[16]$	73
6.13	Vessel posizionato nella culla all'interno della piscina di taglio	74
7.1	Macchina selezionata per il taglio di componenti non attivi $[58]$	78
7.2	Schema di massima della macchina $\operatorname{DACH}^{\textcircled{R}}$	79
7.3	a) Tramoggia KMT per abrasivo [59]; b) Pompa KMT d a 620 MPa e 93 kW	0.0
		80

7.4	Schema di massima della macchina per il taglio dei tubi di guida $\ldots \ldots \ldots$	81
7.5	Disegni con dettagli della macchina per il taglio dei tubi di guida - schema	
	elementi del nocciolo con raffigurazione delle barre preso da [17]	82
7.6	Disegno macchina SCAB $^{\textcircled{R}}$ per il taglio degli internals con contenimento \ldots .	83
A.1	Diagramma di Gantt per la procedura di smantellamento degli internals	90

Elenco delle tabelle

- 2.1 Attivazione degli internals al 1/1/2025 dati presi da [14] $\ldots \ldots \ldots \ldots 20$
- 3.1 Centrali smantellate dalla Westinghouse Electric Company LLC dati presi da [28] 27

Appendice A

Gantt smantellamento internals



Figura A.1: Diagramma di Gantt per la procedura di smantellamento degli internals

Bibliografia

- T. Wellock. Putting the Axe to the 'Scram' Myth. https://public-blog.nrc-gateway.gov/2011/05/17/ putting-the-axe-to-the-scram-myth/, 2011. Consultato: 13 marzo 2022.
- [2] IAEA. Nuclear Power Reactors in the World, 2019. Reference data serie no.2.
- [3] World Nuclear Association. Decommissioning nuclear facilities. https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/ nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx. Consultato: 10 febbraio 2022.
- [4] Nuclear Energy Institute (NEI). Decommissioning Status for Shutdown U.S. Nuclear Plants. https://www.nei.org/resources/statistics/decommissioning-status-forshutdown-us-plants. Consultato: 24 febbraio 2022.
- [5] F. Crivelli. Gestione dei rifiuti radioattivi provenienti dal taglio del Vessel e degli Internals del reattore della centrale elettronucleare di Trino Vercellese. Master's thesis, Politecnico di Torino, Novembre 2021.
- [6] Sogin S.p.A. Trino NPP site presentation. http://www.nuclearenergy.polimi.it/wp-content/uploads/2019/04/ TRINO-NPP-14-12-2018-final.pdf, 2018. Consultato: 13 febbraio 2022.
- [7] Ministero della Giustizia. DECRETO LEGISLATIVO 31 luglio 2020, n.101. https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2020/08/12/201/so/29/sg/pdf, 2020. Consultato: 02 marzo 2022.
- [8] J. Boucau, P. Segerud, and M Sanchez. Best practices for preparing vessel internals segmentation projects. In International symposium on preparation for decommissioning (PREDEC), Lione, Francia, 2016. paper n°53088.
- [9] N. E. Todreas and M. S. Kazimi. Nuclear Systems I Thermal Hydraulic Fundamentals. Taylor & Francis, 1993.

- [10] Alamy. Fissione nucleare. https://www.alamy.it/fissione-nucleare-image444459335.html. Consultato: 25 febbraio 2022.
- [11] S. Rossini. Studio di caratterizzazione radiologica del Vessel della Centrale elettronucleare E. Fermi di Trino ai fini dello smantellamento. Master's thesis, Politecnico di Torino, Aprile 2017.
- [12] Sogin S.p.A. Materiale fornito da SOGIN S.p.A. Ricevuto 08 marzo 2021.
- [13] SELNI S.p.A. L'impianto elettronucleare "Enrico Fermi" di Trino Vercellese. Relazione della divisione tecnica della Società Elettronucleare Italiana.
- [14] S. Rossin, C. Bertani, M. De Salve, B. Panella, and S. Pistelli. Radiological characterization of the reactor pressure vessel of Trino NPP for dismantling purposes. Progress in nuclear energy (New series), 107:17–30, 2018.
- [15] M. Caldarella. Studio preliminare a supporto dell'ottimizzazione delle dosi ai lavoratori coinvolti nelle attività di smantellamento degli internals e le attività di caratterizzazione del Reactor Pressure Vessel (RPV) della Centrale Nucleare di Trino Vercellese. In XXXVII Congresso Nazionale AIRP di Radioprotezione, Bergamo, Italia, 2018. SOGIN S.p.A.
- [16] E. Mastromauro. Smantellamento di impianti nucleari: tecniche di taglio e segmentazione del vessel. Master's thesis, Politecnico di Torino, Ottobre 2005.
- [17] Sogin S.p.A. Rapporto finale di sicurezza. Centrale Elettronucleare "E. Fermi" TRINO, 1989. Doc: TXR.0001.LIFY.0031 Rev.2.
- [18] S. Bushart. Reactor Internals Segmentation Experience Report. Technical Report 1015122, EPRI, 2007.
- [19] GNS. SBoX[®]. https://www.gns.de/language=en/23363/sbox. Consultato: 13 marzo 2022.
- [20] Monsud S.p.A. SOGIN Storage Containers CP-5.2 & CP-2.6. https://www.monsud.it/it/sogin-storage-containers-cp-5-2-cp-2-6/. Consultato: 13 marzo 2022.
- [21] L. Lucini. Impianti elettronucleari ad acqua pressurizzata Un esempio: Trino Vercellese. ENEL-CTN-Milano.
- [22] D. K. Jacobs. Methodology to manage material and waste from nuclear decommissioning. In Nuclear decommissioning international perspectives. Nuclear Engineering International, 2021.

- [23] Sogin S.p.A. Decommissioning. https://www.sogin.it/it/chiusuradelciclonucleare/decommissioning/ Pagine/default.aspx. Consultato: 18 febbraio 2022.
- [24] G. Bolla. Decommissioning of italian nuclear installations: experience and future plans. In Safe decommissioning for nuclear activities, Berlin, 2002. IAEA.
- [25] S. Agnoli and M. Gabanelli. Svolta sui rifiuti nucleari italiani, la Sogin verso il commissariamento. https://www.corriere.it/economia/aziende/22_gennaio_16/svolta-rifiutinucleari-italiani-sogin-il-commissariamento-5957e1be-7636-11ec-abfd-24fbe216e2ae.shtml. Consultato: 18 febbraio 2022.
- [26] Sogin S.p.A. DICHIARAZIONE AMBIENTALE Centrale nucleare di Trino, 2016.
- [27] L. Ferrua. L'incubo della centrale di Trino Vercellese. http://www.digi.to.it/2019/05/28/lincubo-della-centrale-di-trinovercellese/. Consultato: 18 febbraio 2022.
- [28] P. Pospíšil. Reactor Vessel Internals Segmentation Experience using Mechanical Cutting Tools. Technological Engineering, X(2):6–10, 2013.
- [29] Westinghouse Electric Company LLC. PWR Reactor Vessel and Reactor Internals Segmentation and Packaging. https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/DDR-0004%20PWR% 20Reactor%20Vessel%20Feb2018.pdf?ver=2018-02-23-043051-723, 2018. Consultato: 25 febbraio 2022.
- [30] Nuclear Energy Agency. The Management of Large Components from Decommissioning to Storage and Disposal. Technical Report NEA/RWM/R(2012)8, NEA, 2012.
- [31] ENEA-DISP. Guida Tecnica n.26 Gestione dei Rifiuti Radioattivi, 1987.
- [32] Y. H. Hwang, S. Hwang, S. Hong, K. S. Park, N.-K. Kim, D. W. Jung, and C.-W. Kim. A Study on Segmentation Process of the K1 Reactor Vessel and Internals. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 17:437-445, 2019.
- [33] M. Hashish. Pressure effects in abrasive-waterjet (AWJ) machining. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 111(3):221– 228, 1989.

- [34] thyssenkrupp[©]. Water jet cutting. https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/waterjet/en/ waterjet-cutting/. Consultato: 26 gennaio 2022.
- [35] J. M. Llanto, M. Tolouei-Rad, A. Vafadar, and M. Aamir. Recent Progress Trend on Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Materials: A Review. Applied sciences, 11(3344):3344, 2021.
- [36] Flow International Corporation. pagina Facebook "Flow Waterjet". https://www.facebook.com/FlowWaterjet. Consultato: 28 gennaio 2022.
- [37] TECHNI Waterjet. The future in waterjet pumping technology. https://www.techniwaterjet.com/pumps/. Consultato: 29 gennaio 2022.
- [38] M. Hashish, D. E. Steele, and D. H. Bothell. Machining with super-pressure (690 MPa) waterjets. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 37(4):465-479, 1997.
- [39] M. Hashish. Observations on cutting with 600-MPa waterjets. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 124(2):229-233, 2002.
- [40] Z. Huang, G. Li, S. Tian, X. Song, M. Sheng, and S. Shah. Chapter one theoretical basis of abrasive jet. In *Abrasive Water Jet Perforation and Multi-Stage Fracturing*, pages 1–62. Gulf Professional Publishing, 2018.
- [41] Wikipedia. Garnet. https://en.wikipedia.org/wiki/Garnet. Consultato: 8 febbraio 2022.
- [42] C. Wood. Maine Yankee Decommissioning Experience Report. Technical Report 1011734, EPRI, 2005.
- [43] E. Amoroso, F. Mancini, M. Caldarella, R. Botti, and D. Annunziata. Preliminary design of the RPV and RVIs of the Trino and Caorso NPPs – Effective Dose Optimization. In ISOE Symposium, Uppsala, Svezia, 2018. SOGIN S.p.A.
- [44] L. Porse. Single-failure-proof cranes for nuclear power plants, 1979. NUREG-0554.
- [45] Alamy. Trino Vercellese centrale nucleare. https://www.alamy.it/trino-vercellese-centrale-nucleare-nel-processodi-disattivazione-da-parte-della-societa-sogin-responsabile-per-losmantellamento-del-nucleare-italiano-piante-dopo-il-referendum-popolari -del-1987-e-2011-il-coperchio-di-nave-contenitore-che-copre-il-reattore -nucleare-core-image243651867.html. Consultato: 04 marzo 2022.

- [46] A. Zesi. Progetto Vessel Garigliano 2019: smantellamento barre di controllo. Master's thesis, Politecnico di Torino, Luglio 2017.
- [47] CMI. Carroponte. https://www.rivistacmi.it/articolo/carroponte/, 2020. Consultato: 01 marzo 2022.
- [48] Lancs Industries. Tents, Tent accessories, and ventilation units. https://www.lancsindustries.com/tents/. Consultato: 01 marzo 2022.
- [49] J. Boucau and G. Medinilla. Westinghouse Experience in Reactor Vessel Dismantling Projects. https://www.iae.lt/data/public/uploads/2019/03/westinghouse.pdf, 2018. Consultato: 24 febbraio 2022.
- [50] AeroGo. Air Cushion Vehicles. https://www.aerogo.com/products/air-cushion-vehicles/. Consultato: 01 marzo 2022.
- [51] marco fioretti. Paratie antiallagamento: pratiche ed efficaci. https://www.marcofioretti.it/blog/paratie-antiallagamento-pratiche-edefficaci.html. Consultato: 02 marzo 2022.
- [52] R. Reid. Conceptual System Design for Reactor Vessel Internals Segmentation. Technical Report 3002018418, EPRI, 2020.
- [53] L. Brusa, R. De Santis, P. L. Nurden, P. Walkden, and B. Watson. The decommissioning of the Trino nuclear power plant. In WM'02 Conference, Tucson, AZ, 2002.
- [54] IAEA. Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications, 2001. Technical Report 402.
- [55] D. R. Forsyth, B. L. Silverblatt, T. R. Mager, W. A. Bamford, J. A. Tortorice, J. T. Crane, and I. L. W. Wilson. License Renewal Evaluation: Aging Management for Reactor Internals. Technical Report WCAP-14577 Rev.1-A, Westinghouse Owners Group, 2001.
- [56] Superior Coating Solutions. Moist Metal Grip. https://superiorcoatingsolutions.com/moist-metal-grip-liquidreinforcement-coating/. Consultato: 10 marzo 2022.
- [57] R. Thomas. Trojan Nuclear Power Plant Reactor Vessel and Internals Removal. Technical Report 1000920, EPRI, 2000.

- [58] Gruppo SOITAAB. Catalogo Macchine Da Taglio GANTRY. http://www.friggics.com/scheda_prodotto.php?id=14&lang=IT. Consultato: 24 febbraio 2022.
- [59] KMT Waterjet Systems Inc. ABRALINE | Abrasive Bulk Transfer Systems. https://www.kmtwaterjet.com/a-accueil-tremies-abrasif.aspx. Consultato: 10 marzo 2022.
- [60] KMT Waterjet Systems Inc. Pompe STREAMLINE PRO[®]. https://www.kmtwaterjet.com/it/a-pagina-di-destinazione-delle-pompekmt-streamline-pro.aspx. Consultato: 04 marzo 2022.
- [61] Tratos. Tratos Umbilicals STEEL TUBES 5+4CE ELECTRO-HYDRAULIC UMBILICAL. https://tratosgroup.com/product/steel-tubes-5-4-ce-electro-hydraulicumbilical-iec/. Consultato: 10 marzo 2022.
- [62] M. A. Hashish, J. H. Olsen, K. J. Zarin, and G. A. Erichsen. Liquid abrasive cutting jet cartridge and method, 1992. Patent no.5,144,766.
- [63] ISIN. Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione
 Hompage.
 https://www.isinucleare.it/. Consultato: 10 marzo 2022.