

<i>Elaborato</i>	<i>Livello</i>	<i>Tipo</i>	<i>Sistema / Edificio / Argomento</i>	<i>Rev. 02</i>
PU RL 00009 ETQ-00038852	P	RT - Relazioni	RFR - Rifiuti radioattivi	Data 16/10/2015
Centrale / Impianto:	PLUTONIO - Casaccia - TRATTAMENTO RIFIUTI LIQUIDI			
Titolo Elaborato:	Bilancio di materia e caratteristiche del fusto cementato			
Aggiornamento a seguito dell'accorpamento delle soluzioni.				
<i>Timbri e firme per responsabilità di legge</i>				
Autorizzato				
.....				
DWMD/ING Guerra M. DWMD/ING Mattioli A.		DWMD/ING Pancotti F. DWMD/ING Nasta M.	DWMD/CAS Marciani L. DWMD/ING Pancotti F.	DWMD/ING Del Lucchese M.
Incaricato	Collaborazioni	Verifica	Approvazione / Benestare	Autorizzazione all'uso

PROPRIETA'

STATO

LIVELLO DI CLASSIFICAZIONE

Del Lucchese M.

Aziendale

Livello di Classificazione: Pubblico, Aziendale, Riservato Aziendale – riproduzione vietata, Uso Ristretto – riproduzione vietata
Il presente elaborato è di proprietà di Sogin S.p.A. È fatto divieto a chiunque di procedere, in qualsiasi modo e sotto qualsiasi forma, alla sua riproduzione, anche parziale, ovvero di divulgare a terzi qualsiasi informazione in merito, senza autorizzazione rilasciata per scritto da Sogin S.p.A.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



INDICE

<u>1.</u>	<u>PREMESSA.....</u>	<u>4</u>
<u>2.</u>	<u>SCOPO</u>	<u>4</u>
<u>3.</u>	<u>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO</u>	<u>5</u>
3.1	NORMATIVA APPLICABILE	5
3.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
<u>4.</u>	<u>CARATTERISTICHE DEI RIFIUTI DA SOTTOPORRE A CONDIZIONAMENTO.....</u>	<u>6</u>
4.1	GENERALITÀ.....	6
4.2	CARATTERISTICHE GENERALI DEI RIFIUTI.....	6
4.2.1	CORRENTE ALCALINA	6
4.2.2	CORRENTE ACIDA.....	6
4.3	INVENTARIO ISOTOPICO E RADIOLOGICO DI INPUT	7
4.4	PIANI DI ACCORPAMENTO IN BATCH PER INSERIMENTO IN SAG	12
4.5	CEMENTAZIONE DELLE SOLUZIONI ALCALINE.....	14
4.5.1	Simulazione del rifiuto reale.....	14
4.5.2	Ricetta di cementazione e bilancio di materia per singolo fusto cilindrico.....	14
4.5.3	Numero di fusti prodotti	15
4.5.4	Caratteristiche radiologiche dei manufatti prodotti.....	15
4.5.5	Classificazione ai fini del trasporto del rifiuto condizionato.....	16
4.5.6	Conclusioni.....	18
4.6	CEMENTAZIONE DELLE SOLUZIONI ACIDE.....	19
4.6.1	Simulazione del rifiuto reale.....	19
4.6.2	Neutralizzazione	19
4.6.2.1	Valutazione dell'incremento di temperatura associato alla neutralizzazione.....	20
4.6.3	Ricette di cementazione e bilancio di materia per singolo fusto cilindrico.....	22
4.6.4	Numero di fusti prodotti	23
4.6.5	Caratteristiche radiologiche dei manufatti prodotti.....	23

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



4.6.6	Classificazione ai fini del trasporto del rifiuto condizionato.....	25
4.6.7	Conclusioni.....	27

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



1. PREMESSA

Presso l'Impianto Plutonio (IPU) del C.R. Casaccia sono stoccati circa 300 litri di rifiuti liquidi acquosi alfa-contaminati, sia di natura basica che acida, classificabili come "Rifiuti radioattivi di media attività" secondo il Decreto 7 agosto 2015[N1].

Essi provengono, essenzialmente, dai processi TESEO (Trattamento degli Effluenti di Scarico mediante Estrazione con solventi Organici) e PUREX (Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction), utilizzati nel corso del progetto REBA (recupero e trattamento dei REsidui liquidi a Bassa Attività) messo in opera nell'impianto Plutonio nel periodo 1995-2001.

Ai fini dello smaltimento finale, tali rifiuti devono essere sottoposti ad un processo di condizionamento mediante cementazione, che comporti la minimizzazione del volume finale di rifiuto prodotto ovvero del numero di fusti metallici, contenenti la matrice condizionata, che saranno successivamente inviati a deposito.

2. SCOPO

Scopo del presente documento è quello di:

1. individuare le tipologie di correnti di rifiuto liquido acquoso da condizionare, stoccate presso IPU;
2. descrivere, per ogni tipologia di rifiuto, le caratteristiche principali (chimiche, fisiche e radiologiche);
3. individuare un possibile piano di accorpamento in batch omogenei dei rifiuti liquidi da sottoporre alla successiva operazione di cementazione;
4. ipotizzare una possibile ricetta di simulazione del rifiuto reale;
5. per le correnti acide:
 - a) individuare il reagente da impiegare per la neutralizzazione, propedeutica alla cementazione;
 - b) valutare l'incremento di volume del rifiuto associato a tale operazione in funzione della concentrazione del reagente impiegato;
 - c) stimare la massima temperatura sviluppata durante la reazione di neutralizzazione;
6. ipotizzare una possibile formulazione di cementazione a partire dalla quale:
 - d) stimare la massima percentuale di inglobamento del rifiuto nella matrice cementizia;

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



- e) stimare il volume utile e quindi quello geometrico del fusto da impiegare;
- f) stimare il massimo numero di fusti condizionati e dei colli finali;
- g) stimare le caratteristiche radiologiche e procedere, quindi, alla classificazione del fusto cementato e del collo finale.

3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

3.1 **NORMATIVA APPLICABILE**

- [N1]. Decreto 7 agosto 2015 – “Classificazione dei rifiuti radioattivi ai sensi dell’articolo 5 del decreto legislativo 4 marzo 2014, n. 45”.
- [N2]. UNI 11193:2006 “Manufatti di rifiuti radioattivi condizionati. Metodi di prova per la qualificazione dei processi di condizionamento per manufatti appartenenti alla Categoria 2”.
- [N3]. IAEA Safety Standards Series No. SSR-6. “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”. 2012 Edition.
- [N4]. UNI 10621:2011 “Manufatti di rifiuti radioattivi condizionati - Caratterizzazione”.

3.2 **DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

- [R1]. ENEA-DISP “Guida Tecnica n. 26. Gestione dei rifiuti radioattivi”.
- [R2]. PU R 00019 rev.00 “Raccolta e qualificazione dei dati di input per lo Studio di Fattibilità del Processo di Trattamento e Condizionamento dei Reflui Liquidi ad alta attività stoccati presso l’impianto IPU di Casaccia”.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



4. CARATTERISTICHE DEI RIFIUTI DA SOTTOPORRE A CONDIZIONAMENTO

4.1 Generalità

Presso l'Impianto Plutonio (IPU) del sito di Casaccia sono stoccati circa 0,3 m³ di soluzioni acquose alfa-contaminate provenienti, essenzialmente, dal progetto di recupero e trattamento di REsiduali liquidi di Bassa Attività – Progetto REBA (per i dettagli del progetto si rimanda al documento di cui al riferimento [R2]).

Le soluzioni acquose di cui sopra, classificabili come “Rifiuti radioattivi di media attività” secondo il Decreto 7 agosto 2015 [N1], sono stocate in bottiglie in Polietilene (PE) di vario volume, inserite in fusti del tipo Sant’Andrea in acciaio inox.

In base ai dati di caratterizzazione chimico-fisica sono state individuate due tipologie principali di correnti di rifiuto:

- 1) corrente alcalina (242 litri) prevalentemente per Na₂CO₃ e Na₄[UO₂(CO₃)₃];
- 2) corrente acida (72 litri) prevalentemente per HNO₃ e UO₂(NO₃)₂.

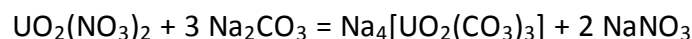
4.2 Caratteristiche generali dei rifiuti

4.2.1 CORRENTE ALCALINA

I rifiuti liquidi acquosi di natura alcalina provengono, essenzialmente, dalla sezione di riestrazione del processo TESEO, che impiegava come estraente una soluzione di Na₂CO₃ 1,2 M.

Essi sono caratterizzati da un contenuto di Plutonio (Pu) pari a 92,34 grammi e da un contenuto di Uranio (U) totale circa pari a 1.015 grammi.

Data la natura del processo da cui tali rifiuti hanno avuto origine, si ipotizza che tutto l'uranio sia presente sotto forma di tricarbonato di uranile proveniente dalla seguente reazione:



4.2.2 CORRENTE ACIDA

I rifiuti liquidi acquosi di natura acida provengono da campagne di lavaggio e da operazioni varie condotte nell’ambito del progetto REBA e da operazioni condotte durante l’esercizio dell’Impianto Plutonio.

Essi sono caratterizzati da un contenuto di Plutonio (Pu) pari a 1,35 grammi e da un contenuto di Uranio (U) totale circa pari a 6.806 grammi.

Si ipotizza che tutto l'uranio sia presente sotto forma di nitrato di uranile.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



4.3 Inventario isotopico e radiologico di input

Nelle tabelle sottostanti viene riportato l'inventario isotopico e radiologico stimato (non essendo disponibile, ad oggi, una caratterizzazione radiologica completa dei liquidi acquosi oggetto del presente documento), utilizzando:

- i valori trasmessi dal Sito in formato MS Excel estratti dalla contabilità di impianto, riferiti al 31/12/1996 e riportati in Tabella 3;
- la composizione isotopica media di impianto per il Pu e l'Am-241, calcolata alla stessa data di riferimento (Tabella 1);
- la composizione isotopica dell'Uranio naturale e quella dell'Uranio impoverito riportata in Tabella 1;
- i valori, relativi a ciascun radionuclide, dei tempi di dimezzamento e delle attività specifiche (Tabella 2).

Tabella 1 - Composizione isotopica media di impianto al 31/12/1996

Pu	Pu-238/Pu-tot	%	0,152
	Pu-239/Pu-tot	%	83,165
	Pu-240/Pu-tot	%	15,353
	Pu-241/Pu-tot	%	0,889
	Pu-242/Pu-tot	%	0,441
U_{nat}	U-235/U-tot	%	0,72
	U-238/U-tot	%	99,28
U_{dep}	U-235/U-tot	%	0,45
	U-238/U-tot	%	99,55
Am	Am-241/Pu-tot	%	2,103

Tabella 2 - Tempi di dimezzamento, costanti di decadimento e attività specifiche di ciascun radionuclide

		<i>Pu-238</i>	<i>Pu-239</i>	<i>Pu-240</i>	<i>Pu-241</i>	<i>Pu-242</i>	<i>U-235</i>	<i>U-238</i>	<i>Am-241</i>
<i>T_{1/2}</i>	<i>[y]</i>	8,77E+01	2,41E+04	6,56E+03	1,44E+01	3,73E+05	7,04E+08	4,47E+09	4,32E+02
<i>Att.Sp.</i>	<i>[Bq/g]</i>	6,34E+11	2,30E+09	8,40E+09	3,83E+12	1,47E+08	8,00E+04	1,24E+04	1,27E+11

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Tabella 3 - Inventario isotopico per ciascuna bottiglia in PE al 31/12/1996

Bottiglia	Pu [g]	U_{nat} [g]	U_{dep} [g]	Volume [l]	Pu-238 [g]	Pu-239 [g]	Pu-240 [g]	Pu-241 [g]	Pu-242 [g]	U-235 [g]	U-238 [g]	Am-241 [g]
CT-1	3,330	16,90	-	10	5,07E-03	2,77E+00	5,11E-01	2,96E-02	1,47E-02	1,22E-01	1,68E+01	7,00E-02
CT-2	4,398	23,88	-	10	6,70E-03	3,66E+00	6,75E-01	3,91E-02	1,94E-02	1,72E-01	2,37E+01	9,25E-02
CT-3	4,050	54,72	-	10	6,17E-03	3,37E+00	6,22E-01	3,60E-02	1,79E-02	3,94E-01	5,43E+01	8,52E-02
CT-4	4,368	27,86	-	10	6,65E-03	3,63E+00	6,71E-01	3,88E-02	1,93E-02	2,01E-01	2,77E+01	9,19E-02
CT-5	3,492	52,72	-	10	5,32E-03	2,90E+00	5,36E-01	3,10E-02	1,54E-02	3,80E-01	5,23E+01	7,34E-02
CT-6	4,815	73,61	-	10	7,33E-03	4,00E+00	7,39E-01	4,28E-02	2,12E-02	5,30E-01	7,31E+01	1,01E-01
CT-7	3,681	45,76	-	10	5,60E-03	3,06E+00	5,65E-01	3,27E-02	1,62E-02	3,29E-01	4,54E+01	7,74E-02
CT-8	5,035	52,73	-	10	7,67E-03	4,19E+00	7,73E-01	4,48E-02	2,22E-02	3,80E-01	5,24E+01	1,06E-01
CT-9	4,487	44,77	-	10	6,83E-03	3,73E+00	6,89E-01	3,99E-02	1,98E-02	3,22E-01	4,45E+01	9,44E-02
CT-10	4,448	28,85	-	10	6,77E-03	3,70E+00	6,83E-01	3,95E-02	1,96E-02	2,08E-01	2,86E+01	9,35E-02
CT-11	2,647	18,90	-	10	4,03E-03	2,20E+00	4,06E-01	2,35E-02	1,17E-02	1,36E-01	1,88E+01	5,57E-02
CT-12	3,830	18,80	-	10	5,83E-03	3,19E+00	5,88E-01	3,41E-02	1,69E-02	1,35E-01	1,87E+01	8,05E-02
CT-13	3,701	53,73	-	10	5,63E-03	3,08E+00	5,68E-01	3,29E-02	1,63E-02	3,87E-01	5,33E+01	7,78E-02
CT-14	4,517	50,74	-	10	6,88E-03	3,76E+00	6,93E-01	4,02E-02	1,99E-02	3,65E-01	5,04E+01	9,50E-02
CT-15	2,985	28,85	-	10	4,54E-03	2,48E+00	4,58E-01	2,65E-02	1,32E-02	2,08E-01	2,86E+01	6,28E-02
CT-16	3,552	44,77	-	10	5,41E-03	2,95E+00	5,45E-01	3,16E-02	1,57E-02	3,22E-01	4,45E+01	7,47E-02
CT-17	6,468	56,81	-	15	9,85E-03	5,38E+00	9,93E-01	5,75E-02	2,85E-02	4,09E-01	5,64E+01	1,36E-01
CT-18	4,398	26,86	-	10	6,70E-03	3,66E+00	6,75E-01	3,91E-02	1,94E-02	1,93E-01	2,67E+01	9,25E-02

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Bottiglia	Pu [g]	U_{nat} [g]	U_{dep} [g]	Volume [l]	Pu-238 [g]	Pu-239 [g]	Pu-240 [g]	Pu-241 [g]	Pu-242 [g]	U-235 [g]	U-238 [g]	Am-241 [g]
CT-19	5,045	33,83	-	10	7,68E-03	4,20E+00	7,75E-01	4,49E-02	2,22E-02	2,44E-01	3,36E+01	1,06E-01
CT-20	4,229	56,71	-	10	6,44E-03	3,52E+00	6,49E-01	3,76E-02	1,86E-02	4,08E-01	5,63E+01	8,89E-02
CT-21/A	1,841	49,50	-	5	2,80E-03	1,53E+00	2,83E-01	1,64E-02	8,12E-03	3,56E-01	4,91E+01	3,87E-02
CT-21/B	0,990	46,53	-	5	1,51E-03	8,23E-01	1,52E-01	8,80E-03	4,37E-03	3,35E-01	4,62E+01	2,08E-02
CT-21/LAV.	0,327	-	-	5	4,98E-04	2,72E-01	5,02E-02	2,91E-03	1,44E-03	0,00E+00	0,00E+00	6,88E-03
U-20/1 A	0,008	878,2	-	10	1,22E-05	6,64E-03	1,23E-03	7,10E-05	3,52E-05	6,32E+00	8,72E+02	1,68E-04
U-20/1 B	0,008	878,2	-	10	1,22E-05	6,64E-03	1,23E-03	7,10E-05	3,52E-05	6,32E+00	8,72E+02	1,68E-04
U-20/1 C	0,002	175,6	-	2	2,43E-06	1,33E-03	2,45E-04	1,42E-05	7,04E-06	1,26E+00	1,74E+02	3,36E-05
CTC-5	0,233	-	24,69	5	3,55E-04	1,94E-01	3,58E-02	2,07E-03	1,03E-03	1,36E-01	2,46E+01	4,90E-03
CTC-2	1,337	-	19,80	5	2,03E-03	1,11E+00	2,05E-01	1,19E-02	5,89E-03	1,09E-01	1,97E+01	2,81E-02
CTC-3	1,406	-	14,85	5	2,14E-03	1,17E+00	2,16E-01	1,25E-02	6,20E-03	8,17E-02	1,48E+01	2,96E-02
CTC-4	1,431	-	20,79	5	2,18E-03	1,19E+00	2,20E-01	1,27E-02	6,31E-03	1,14E-01	2,07E+01	3,01E-02
CTC-1	1,495	-	21,78	5	2,28E-03	1,24E+00	2,30E-01	1,33E-02	6,59E-03	1,20E-01	2,17E+01	3,14E-02
UL-18	-	-	3376,3	10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,86E+01	3,36E+03	0,00E+00
1-CONT	0,037	5,97	-	10	5,60E-05	3,06E-02	5,65E-03	3,27E-04	1,62E-04	4,30E-02	5,92E+00	7,74E-04
RC/15	0,978	1492,0	-	25	1,49E-03	8,13E-01	1,50E-01	8,70E-03	4,31E-03	1,07E+01	1,48E+03	2,06E-02
Resti CT-12A	0,700	4,95	-	2	1,07E-03	5,82E-01	1,07E-01	6,22E-03	3,09E-03	3,56E-02	4,91E+00	1,47E-02
TOTALE	94,3	4342,9	3478,2	314	1,44E-01	7,84E+01	1,45E+01	8,38E-01	4,16E-01	5,04E+01	7,77E+03	1,98E+00

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Tabella 4 - Inventario radiologico per ciascuna bottiglia in PE al 31/12/1996

Bottiglia	Pu [g]	U_{nat} [g]	U_{dep} [g]	Volume [l]	Pu-238 [Bq]	Pu-239 [Bq]	Pu-240 [Bq]	Pu-241 [Bq]	Pu-242 [Bq]	U-235 [Bq]	U-238 [Bq]	Am-241 [Bq]
CT-1	3,330	16,90	-	10	3,21E+09	6,36E+09	4,30E+09	1,13E+11	2,15E+06	9,74E+03	2,09E+05	8,90E+09
CT-2	4,398	23,88	-	10	4,25E+09	8,40E+09	5,67E+09	1,50E+11	2,84E+06	1,38E+04	2,95E+05	1,18E+10
CT-3	4,050	54,72	-	10	3,91E+09	7,74E+09	5,22E+09	1,38E+11	2,62E+06	3,15E+04	6,76E+05	1,08E+10
CT-4	4,368	27,86	-	10	4,22E+09	8,34E+09	5,64E+09	1,49E+11	2,82E+06	1,61E+04	3,44E+05	1,17E+10
CT-5	3,492	52,72	-	10	3,37E+09	6,67E+09	4,50E+09	1,19E+11	2,26E+06	3,04E+04	6,52E+05	9,33E+09
CT-6	4,815	73,61	-	10	4,65E+09	9,20E+09	6,21E+09	1,64E+11	3,11E+06	4,24E+04	9,10E+05	1,29E+10
CT-7	3,681	45,76	-	10	3,55E+09	7,03E+09	4,75E+09	1,25E+11	2,38E+06	2,64E+04	5,65E+05	9,84E+09
CT-8	5,035	52,73	-	10	4,86E+09	9,62E+09	6,50E+09	1,71E+11	3,25E+06	3,04E+04	6,52E+05	1,35E+10
CT-9	4,487	44,77	-	10	4,33E+09	8,57E+09	5,79E+09	1,53E+11	2,90E+06	2,58E+04	5,53E+05	1,20E+10
CT-10	4,448	28,85	-	10	4,29E+09	8,50E+09	5,74E+09	1,51E+11	2,87E+06	1,66E+04	3,57E+05	1,19E+10
CT-11	2,647	18,90	-	10	2,56E+09	5,06E+09	3,41E+09	9,01E+10	1,71E+06	1,09E+04	2,34E+05	7,08E+09
CT-12	3,830	18,80	-	10	3,70E+09	7,32E+09	4,94E+09	1,30E+11	2,47E+06	1,08E+04	2,32E+05	1,02E+10
CT-13	3,701	53,73	-	10	3,57E+09	7,07E+09	4,77E+09	1,26E+11	2,39E+06	3,10E+04	6,64E+05	9,89E+09
CT-14	4,517	50,74	-	10	4,36E+09	8,63E+09	5,83E+09	1,54E+11	2,92E+06	2,92E+04	6,27E+05	1,21E+10
CT-15	2,985	28,85	-	10	2,88E+09	5,70E+09	3,85E+09	1,02E+11	1,93E+06	1,66E+04	3,57E+05	7,98E+09
CT-16	3,552	44,77	-	10	3,43E+09	6,79E+09	4,58E+09	1,21E+11	2,29E+06	2,58E+04	5,53E+05	9,49E+09
CT-17	6,468	56,81	-	15	6,24E+09	1,24E+10	8,34E+09	2,20E+11	4,18E+06	3,27E+04	7,02E+05	1,73E+10
CT-18	4,398	26,86	-	10	4,25E+09	8,40E+09	5,67E+09	1,50E+11	2,84E+06	1,55E+04	3,32E+05	1,18E+10

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Bottiglia	Pu [g]	U _{nat} [g]	U _{dep} [g]	Volume [l]	Pu-238 [Bq]	Pu-239 [Bq]	Pu-240 [Bq]	Pu-241 [Bq]	Pu-242 [Bq]	U-235 [Bq]	U-238 [Bq]	Am-241 [Bq]
CT-19	5,045	33,83	-	10	4,87E+09	9,64E+09	6,51E+09	1,72E+11	3,26E+06	1,95E+04	4,18E+05	1,35E+10
CT-20	4,229	56,71	-	10	4,08E+09	8,08E+09	5,46E+09	1,44E+11	2,73E+06	3,27E+04	7,01E+05	1,13E+10
CT-21/A	1,841	49,50	-	5	1,78E+09	3,52E+09	2,38E+09	6,26E+10	1,19E+06	2,85E+04	6,12E+05	4,92E+09
CT-21/B	0,990	46,53	-	5	9,56E+08	1,89E+09	1,28E+09	3,37E+10	6,40E+05	2,68E+04	5,75E+05	2,65E+09
CT-21/LAV.	0,327	-	-	5	3,16E+08	6,25E+08	4,22E+08	1,11E+10	2,11E+05	0,00E+00	0,00E+00	8,74E+08
U-20/1 A	0,008	878,2	-	10	7,71E+06	1,53E+07	1,03E+07	2,72E+08	5,16E+03	5,06E+05	1,09E+07	2,13E+07
U-20/1 B	0,008	878,2	-	10	7,71E+06	1,53E+07	1,03E+07	2,72E+08	5,16E+03	5,06E+05	1,09E+07	2,13E+07
U-20/1 C	0,002	175,6	-	2	1,54E+06	3,05E+06	2,06E+06	5,43E+07	1,03E+03	1,01E+05	2,17E+06	4,27E+06
CTC-5	0,233	-	24,69	5	2,25E+08	4,45E+08	3,01E+08	7,93E+09	1,51E+05	1,09E+04	3,06E+05	6,23E+08
CTC-2	1,337	-	19,80	5	1,29E+09	2,55E+09	1,72E+09	4,55E+10	8,63E+05	8,72E+03	2,45E+05	3,57E+09
CTC-3	1,406	-	14,85	5	1,36E+09	2,69E+09	1,81E+09	4,78E+10	9,08E+05	6,54E+03	1,84E+05	3,76E+09
CTC-4	1,431	-	20,79	5	1,38E+09	2,73E+09	1,85E+09	4,87E+10	9,24E+05	9,15E+03	2,57E+05	3,82E+09
CTC-1	1,495	-	21,78	5	1,44E+09	2,86E+09	1,93E+09	5,09E+10	9,66E+05	9,59E+03	2,70E+05	4,00E+09
UL-18	-	-	3376,3	10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,49E+06	4,18E+07	0,00E+00
1-CONT	0,037	5,97	-	10	3,55E+07	7,03E+07	4,75E+07	1,25E+09	2,38E+04	3,44E+03	7,37E+04	9,84E+07
RC/15	0,978	1492,0	-	25	9,44E+08	1,87E+09	1,26E+09	3,33E+10	6,32E+05	8,60E+05	1,84E+07	2,61E+09
Resti CT-12A	0,700	4,95	-	2	6,76E+08	1,34E+09	9,03E+08	2,38E+10	4,52E+05	2,85E+03	6,12E+04	1,87E+09
TOTALE	94,3	4342,9	3478,2	314	9,10E+10	1,80E+11	1,22E+11	3,21E+12	6,09E+07	4,03E+06	9,67E+07	2,52E+11

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



4.4 Piani di accorpamento in batch per inserimento in SaG

Le correnti di rifiuto stoccate presso IPU saranno accorpate per essere successivamente condizionate mediante cementazione, in batch omogenei dal volume generalmente pari a circa 10 litri.

I contenitori all'interno dei quali i rifiuti verranno trasferiti, saranno successivamente introdotti all'interno della SaG.

Viene riportato, di seguito, il piano di accorpamento previsto per la corrente alcalina dei rifiuti in esame (i dati sono stati aggiornati alla data di riferimento del 31/12/2014):

Tabella 5 - Piano di accorpamento ipotizzato per la corrente alcalina di rifiuto liquido

Batch	Bottiglie	Vol. [l]	Pu [g]	U_{nat} [g]	U_{dep} [g]	Am [g]	Pu [g/l]	U [g/l]	Am [g/l]	pH
1	CT-1	10	3,31	16,90		0,085	0,331	1,690	0,008	10
2	CT-2	10	4,37	23,88		0,112	0,437	2,388	0,011	9,35
3	CT-3	10	4,03	54,72		0,103	0,403	5,472	0,010	9,6
4	CT-4	10	4,34	27,86		0,111	0,434	2,786	0,011	9,9
5	CT-5	10	3,47	52,72		0,089	0,347	5,272	0,009	9,87
6	CT-6	10	4,79	73,61		0,123	0,479	7,361	0,012	9,7
7	CT-7	10	3,66	45,76		0,094	0,366	4,576	0,009	9,4
8	CT-8	10	5,00	52,73		0,128	0,500	5,273	0,013	9,77
9	CT-9	10	4,46	44,77		0,114	0,446	4,477	0,011	9,4
10	CT-10	10	4,42	28,85		0,113	0,442	2,885	0,011	9,55
11	CT-11	10	2,63	18,90		0,068	0,263	1,890	0,007	9,2
12	CT-12	10	3,81	18,80		0,098	0,381	1,880	0,010	9,49
13	CT-13	10	3,68	53,73		0,094	0,368	5,373	0,009	9,29
14	CT-14	10	4,49	50,74		0,115	0,449	5,074	0,012	8,75
15	CT-15	10	2,97	28,85		0,076	0,297	2,885	0,008	9,39
16	CT-16	10	3,53	44,77		0,091	0,353	4,477	0,009	9,4
17	CT-17/1	10	4,29	37,87		0,110	0,429	3,787	0,011	9,2
18	CT-18	10	4,37	26,86		0,112	0,437	2,686	0,011	9,12
19	CT-19	10	5,01	33,83		0,129	0,501	3,383	0,013	8,97
20	CT-20	10	4,20	56,71		0,108	0,420	5,671	0,011	8,93
21	CT-21/A + CT-21/B	10	2,81	96,03		0,072	0,281	9,603	0,007	8,55
22	CTC-1 + CT-17/2	10	3,63	18,94	21,78	0,093	0,363	4,072	0,009	8,89
23	CTC-2 + CTC-4	10	2,75		40,59	0,071	0,275	4,059	0,007	9,1
24	CTC-3 + CTC-5	10	1,63		39,54	0,042	0,163	3,954	0,004	8,68
25	RESTI CT - 12/A	2	0,70	4,95		0,018	0,348	2,475	0,009	9,1
TOT.		242	92,3	912,8	101,9	2,37				

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



La scelta del piano di accorpamento per la corrente alcalina, ipotizzato nella tabella precedente (Tabella 5), è stata effettuata sulla base delle informazioni relative alla provenienza dei rifiuti stessi. Pertanto, si prevede che il piano di accorpamento reale non si discosterà in maniera significativa da quello ipotizzato¹. Inoltre, esso consente di ottenere valori di concentrazioni di Uranio e di Plutonio simili, per ciascun batch da inviare successivamente a condizionamento e, quindi, di ipotizzare un'unica ricetta di cementazione.

Per quanto riguarda, invece, la corrente acida dei rifiuti liquidi in esame il piano di accorpamento dovrà essere tale da permettere l'ottenimento di batch omogenei, di volume pari a circa 10 litri, caratterizzati da contenuti di Uranio e Plutonio prossimi a quelli medi stimati e riportati nella Tabella 6 sottostante² (i dati sono stati aggiornati, anche in questo caso, al 31/12/2014).

Tabella 6- Individuazione dei valori medi di concentrazione di Uranio e Plutonio nella corrente acida di rifiuto liquido

Bottiglie	Vol. [l]	Pu [g]	U_{nat} [g]	U_{dep} [g]	Am [g]	Pu [g/l]	U [g/l]	Am [g/l]	pH
CT-21/LAV	5	0,325	0,000	0,000	0,0083	0,0650	0,00	0,0017	0,53
U-20/1	22	0,017	1.932	0,000	0,0004	0,0008	87,82	0,0000	0,82
UL-18	10	0,000	0,000	3.376	0,000	0,0000	337,63	0,0000	-0,57
1-CONT	10	0,037	5,97	0,000	0,0009	0,0037	0,597	0,0001	1,27
RC/15	25	0,972	1.492	0,000	0,0250	0,0389	59,68	0,0010	-0,96
TOT.	72	1,35	3.430	3.376	0,0347				

In base a quanto riportato nella Tabella 5, si evince che per la corrente alcalina la massima concentrazione di Pu è pari a 0,5 g/l e la massima concentrazione di U è pari a 9,6 g/l.

Per la corrente acida, invece, si ha una concentrazione di Pu media pari a 0,019 g/l e una concentrazione di U media pari a 94,5 g/l (Tabella 6).

Chiaramente, tali valori, sono affetti almeno dallo stesso livello di incertezza associato alle misure e alle stime relative alle singole bottiglie in PE.

Ai fini della simulazione del rifiuto reale, dal punto di vista del suo comportamento chimico-fisico, per la corrente di rifiuto alcalina si considera quindi, un'unica corrente con una concentrazione di uranio pari a circa 10,0 g/l mentre per quella acida, si considera, in via conservativa, una corrente unica con una concentrazione di U pari a circa 120,0 g/l³.

¹ Per tale motivo la concentrazione di U presa a riferimento nel seguito per l'ipotesi di simulazione del rifiuto reale non è stata soggetta a maggiorazione.

² Per ottenere le concentrazioni prossime a quelle medie, si può ipotizzare di distribuire la corrente UL-18 (più critica in termini di contenuto di Uranio) nelle altre correnti.

³ Il piano di accorpamento delle correnti acide di rifiuto sarà tale da non avere una concentrazione di Uranio maggiore di 120 g/l (valore medio maggiorato di circa il 20%).

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



4.5 Cementazione delle soluzioni alcaline

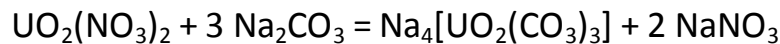
All'interno della SaG è previsto un serbatoio in cui verrà trasferito il rifiuto liquido in attesa di essere cementato.

Si ipotizza che al serbatoio vengano trasferiti 10 litri di soluzione alla volta (una bottiglia).

4.5.1 Simulazione del rifiuto reale

Ipotesi di partenza:

- ✓ Si suppone che le diverse correnti alcaline possano essere ricondotte ad un'unica corrente di rifiuto caratterizzata da una concentrazione di U pari a 10,0 g/l;
- ✓ Si suppone che tutto l'uranio sia presente in soluzione sotto forma di tricarbonato di uranile ($\text{Na}_4[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$) e che esso provenga dalla seguente reazione:



- ✓ Il reagente impiegato in laboratorio per ottenere il tricarbonato di uranile a partire dal nitrato di uranile è il composto esaidrato ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$);
- ✓ Si suppone che le correnti alcaline non necessitino di alcun pre-trattamento propedeutico alla cementazione.
- ✓ Si considera una densità media della soluzione pari a $1,1^4$ kg/l.

4.5.2 Ricetta di cementazione e bilancio di materia per singolo fusto cilindrico

Il manufatto finale prodotto dall'impianto di cementazione sarà costituito dal rifiuto radioattivo condizionato in matrice cementizia in forma omogenea (waste-form), e da un fusto cilindrico in acciaio inossidabile di volume interno utile circa pari a 20 litri (di seguito indicato con la sigla CC-30) in cui la matrice stessa sarà contenuta.

Nelle analisi e nei calcoli relativi ai bilanci di materia, di seguito riportati, si è ipotizzato un rapporto acqua/cemento (a/c) pari a 0,5 valore tipicamente utilizzato per garantire un giusto compromesso tra una buona lavorabilità dell'impasto e una buona resistenza meccanica della matrice prodotta (intervallo pratico $0,4 \div 0,6$).

Considerando, come detto in precedenza, un quantitativo di rifiuto da cementare pari a 10 litri per ciascun fusto, si ricava che il volume utile di quest'ultimo, necessario a tale scopo è circa pari a 15 litri e che la percentuale di inglobamento di rifiuto nella matrice cementizia risulta essere circa pari al 41% (percentuale in peso).

Nei bilanci di materia calcolati e riportati nella Tabella 7, si è assunto l'utilizzo di circa 1 litro di acqua per il lavaggio della linea di adduzione del rifiuto stesso.

Ai fini dei calcoli del volume interno utile del fusto, la densità finale dell'impasto cementizio

⁴Dalle analisi eseguite in Sito.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



è stata assunta conservativamente pari a 1.800 kg/m³.

Si riportano, nella Tabella 7 sottostante, i principali valori utilizzati ai fini dei bilanci di materia (per singolo fustino cilindrico) ottenuti dalla ricetta di cementazione ipotizzata per la corrente alcalina e descritta nei paragrafi precedenti.

Si sottolinea, come il volume utile interno del fustino cilindrico dovrà tenere conto anche del volume occupato dalla girante interna ed essere calcolato fino al punto più alto della struttura miscelatrice, corrispondente al livello massimo di riempimento previsto.

Tabella 7 - Bilancio di materia per singolo fusto cilindrico (corrente di rifiuto alcalina)

Volume rifiuto liquido acquoso	[l]	10
Densità rifiuto liquido acquoso	[kg/l]	1,1
Massa rifiuto liquido acquoso	[kg]	11
Rapporto acqua/cemento	-	0,5
Acqua di lavaggio	[l]	1
Massa Cemento Totale	[kg]	15,02
Massa totale forma del rifiuto cementato	[kg]	27,02
Densità impasto cementizio	[kg/l]	1,8
V_{utile}	[l]	15
Inglobamento rifiuto nel manufatto cementato (% in peso)	-	41%

4.5.3 Numero di fusti prodotti

Supponendo, come detto in precedenza, di cementare in ciascun fusto cilindrico 10 litri di rifiuto liquido appartenente alla corrente alcalina, per la cementazione omogenea di 242 litri totali di rifiuti saranno necessari 25 fusti CC-30.

4.5.4 Caratteristiche radiologiche dei manufatti prodotti

Come indicato nel paragrafo 4.5.2, all'interno di un manufatto cementato verranno inglobati circa 11,0 kg di rifiuto liquido acquoso appartenente alla corrente alcalina.

Per tale quantitativo di rifiuto, vengono assunti, come valori di concentrazione di Uranio, di Plutonio e di Americio, quelli massimi riportati in Tabella 5 e pari, quindi, rispettivamente a 9,6 g/l, 0,5 g/l e 0,013 g/l. Viene, cioè, considerato un inventario radioisotopico conservativo rispetto a quello che sarà realmente presente in ciascun batch da 10 litri destinato alla cementazione nel singolo fusto.

Nella Tabella 8 si riporta l'inventario radioisotopico relativo al batch appena descritto, calcolato al 31/12/2014 e la concentrazione di attività, per ciascun radioisotopo, nella forma del rifiuto cementato.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Tabella 8 - Inventario radioisotopico e concentrazione di attività nel batch di corrente alcalina condizionato

	Concentrazione [g/l]	Massa [g]	Attività [Bq]	Concentrazione di Attività nel manufatto [Bq/g]	Limite per LLW (D.M. 07/08/2015⁵) [Bq/g]
Pu-238	-	6,66E-03	4,22E+09	1,56E+05	<ul style="list-style-type: none"> • Radionuclidi a vita breve ≤ 5 MBq/g • Ni59-Ni63 ≤ 40 kBq/g • Radionuclidi a lunga vita ≤ 400 Bq/g
Pu-239		4,19E+00	9,63E+09	3,56E+05	
Pu-240		7,73E-01	6,50E+09	2,40E+05	
Pu-241		1,88E-02	7,19E+10	2,67E+06	
Pu-242		2,22E-02	3,26E+06	1,21E+02	
TOTALE Pu	0,5	5,01E+00	9,23E+10	3,41E+06	
U-235	-	6,91E-01	5,53E+04	2,05E+00	
U-238		9,53E+01	1,19E+06	4,39E+01	
TOTALE U	9,6	9,60E+01	1,25E+06	4,60E+01	
Am-241	0,013	1,29E-01	1,64E+10	6,05E+05	
TOTALE			1,09E+11	4,02E+06	

Dalla Tabella 8 si può notare che, sulla base delle ipotesi di condizionamento di cui ai paragrafi precedenti, i rifiuti sono preliminarmente classificabili come "Rifiuti Radioattivi di media attività" ai sensi del Decreto di cui al riferimento [N1], in quanto le concentrazioni di attività dei singoli radionuclidi superano i limiti indicati per i rifiuti radioattivi di bassa attività (LLW). I manufatti che verranno prodotti sono da classificare come manufatti di Categoria 3 sulla base della classificazione indicata nella Normativa UNI-10621 ([N4]), sostanzialmente a causa delle elevate concentrazioni di α-emettitori.

4.5.5 Classificazione ai fini del trasporto del rifiuto condizionato

Il rifiuto condizionato all'interno della matrice cementizia può essere classificato, ai sensi dei par. 226 e 408 della IAEA SSR-6 [N3], come materiale LSA III.

Infatti, per tale classificazione, si richiede che il materiale solido (escluso ogni schermo), nel quale l'attività è completamente e uniformemente distribuita, presenti un'attività specifica media stimata non superiore a $2 \times 10^{-3} A_2/g$.

Presentando il rifiuto in considerazione una miscela di radioisotopi, il valore di riferimento per A_2 (della miscela) deve essere ricavato dalla seguente formula (vedi par. 405 della IAEA SSR-6).

$$X_m = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}}$$

dove:

- f(i) è la frazione di attività o di concentrazione di attività del radionuclide i nel miscuglio;

⁵ Per LLW si intende rifiuto radioattivo di bassa attività.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



- X(i) è l'appropriato valore di A₂ relativo al singolo radionuclide i;
- X_m è il valore calcolato di A₂, nel caso di una miscela di radionuclidi.

Nella Tabella 9 si riportano le valutazioni numeriche per il calcolo del valore di A₂ (X_m)⁶ per il miscuglio di radionuclidi in esame, sulla base dell'attività massima che può essere presente in un manufatto prodotto dalla cementazione del batch da 10 litri, descritto in precedenza e facente parte della corrente alcalina dei rifiuti liquidi oggetto del presente documento.

Tabella 9 - Determinazione del valore di A₂ (X_m) del rifiuto condizionato (corrente alcalina)

Radionuclidi	Attività [TBq]	f(i)	A ₂ [X(i)] [TBq]	f(i)/X(i) [TBq ⁻¹]
Pu-238	4,22E-03	3,89E-02	1,00E-03	3,89E+01
Pu-239	9,63E-03	8,87E-02	1,00E-03	8,87E+01
Pu-240	6,50E-03	5,98E-02	1,00E-03	5,98E+01
Pu-241	7,19E-02	6,62E-01	6,00E-02	1,10E+01
Pu-242	3,26E-06	3,00E-05	1,00E-03	3,00E-02
U-235	5,53E-08	5,09E-07	Illimitato	0,00E+00
U-238	1,19E-06	1,09E-05	Illimitato	0,00E+00
Am-241	1,64E-02	1,51E-01	1,00E-03	1,51E+02
Totale	1,09E-01			
$\Sigma f(i)/X(i)$				3,49E+02

Con i valori presenti in Tabella 9 si ricava:

$$A_2 = X_m = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}} = 2,87 * 10^{-3} TBq$$

da cui il limite per LSA III risulta:

$$\frac{2 * 10^{-3} * A_2}{g} = 5,73 * 10^{-6} \frac{TBq}{g}$$

Il valore massimo dell'attività specifica nella matrice cementizia proveniente dalla cementazione del batch da 10 litri, descritto in precedenza e rappresentante la corrente alcalina, è uguale a 4,02E-06 TBq/g (si veda, a tal proposito, la Tabella 8).

Essendo tale valore inferiore al limite calcolato per LSA III, il rifiuto condizionato ricade in tale tipologia per la classificazione secondo la Normativa sul Trasporto IAEA [N3].

Inoltre, il quantitativo di attività contenuta all'interno della matrice cementizia è tale da dar luogo ad un rateo di dose massimo a tre metri dalla matrice (senza considerare la presenza di elementi schermanti e dello spessore in acciaio del fusto cilindrico stesso) decisamente inferiore ai 10 mSv/h, imposti dalla stessa normativa IAEA.

⁶ Vedi par. 201 e Tabella 2 della sezione IV della IAEA SSR-6 [N2].

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



In considerazione di tali caratteristiche della matrice, è ammesso il suo trasporto utilizzando un collo di tipo IP II, in condizioni di uso esclusivo.

Sul fusto verranno condotte le prove necessarie per dimostrare il rispetto di tutti i requisiti definiti dalla normativa sul trasporto IAEA SSR-6 [N3], necessari per ottenere la qualifica come collo di tipo IP II e per rispettare i vincoli di dose, a contatto e a 1 metro, definiti dalla normativa IAEA stessa.

Ciò permetterà di trasportare i manufatti prodotti al Deposito Nazionale, quando questo sarà disponibile, senza necessità di utilizzo di ulteriori contenitori da trasporto (a meno di esigenze e/o richieste diverse da parte del Deposito Nazionale stesso).

4.5.6 Conclusioni

In base alle considerazioni di cui ai paragrafi precedenti si può concludere che:

- ✓ Per la cementazione di un batch di rifiuto costituito da 10 litri di soluzione alcalina è necessario un volume utile circa pari a 15 litri, da cui un fusto dal volume geometrico circa pari a 30 litri;
- ✓ Il serbatoio di ricezione del rifiuto liquido dovrà essere dimensionato per contenere almeno 10 litri di rifiuto liquido;
- ✓ Per la cementazione di batch da 10 litri di rifiuto liquido facente parte della corrente alcalina, sarà necessaria una quantità di cemento circa pari a 15 kg;
- ✓ Sulla base delle ipotesi di condizionamento adottate i rifiuti sono classificabili come “Rifiuti Radioattivi di Media Attività” ai sensi del [N1];
- ✓ I manufatti che verranno prodotti dalla cementazione dei batch da 10 litri ciascuno di soluzione alcalina, sono da classificare come manufatti di Categoria 3 principalmente a causa delle elevate concentrazioni di α -emettitori presenti in essi, secondo i riferimenti [R1] e [N4];
- ✓ Per quanto riguarda la classificazione dei manufatti ai fini del trasporto, il materiale contenuto all'interno del fusto cilindrico CC-30, a seguito del processo di condizionamento (costituito quindi dal rifiuto condizionato in forma omogenea in matrice cementizia), è classificabile come materiale LSA III e trasportabile, quindi, in contenitori di tipo IP II, in condizioni di uso esclusivo. È stato inoltre verificato il rispetto del limite di rateo di dose a 3 m dal materiale nudo, risultando un valore di rateo di dose decisamente inferiore al limite di 10 mSv/h imposto dalla normativa IAEA suddetta ([N3]). Ai fini del trasporto, rimangono tuttavia da verificare i limiti di ratei di dose, a contatto e a 1 metro dal collo, imposti dalla suddetta normativa IAEA.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



4.6 Cementazione delle soluzioni acide

All'interno della SaG di cementazione, oltre al serbatoio di adduzione del rifiuto liquido al fusto, sarà presente un secondo serbatoio, necessario alla neutralizzazione dei rifiuti liquidi appartenenti alla corrente acida. La capacità volumetrica di tale serbatoio dovrà tener conto dell'incremento di volume associato al processo di neutralizzazione.

4.6.1 Simulazione del rifiuto reale

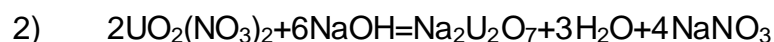
Ipotesi di partenza:

- ✓ Si considera una concentrazione di Uranio pari a 120,0 g/l;
- ✓ Si suppone che tutto l'uranio sia presente in soluzione sottoforma di nitrato di uranile;
- ✓ Si considera che come reagenti principali per la simulazione del rifiuto vengano impiegati il composto esaidrato del nitrato di uranile ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e acido nitrico;
- ✓ Si considera che la corrente acida di riferimento abbia una molarità HNO_3 pari a 4,6⁷;
- ✓ Ai fini del presente documento si trascura la presenza degli altri componenti, presenti in concentrazione ben inferiore rispetto al nitrato di uranile e all'acido nitrico;
- ✓ Si considera una densità media della soluzione pari a circa 1,29 kg/l.

4.6.2 Neutralizzazione

La corrente di rifiuto di natura acida, prima di essere inviata a cementazione, deve essere sottoposta ad un pretrattamento (neutralizzazione) al fine di renderla compatibile con il processo stesso di cementazione.

Si prevede l'impiego di NaOH come agente neutralizzante. Ai fini del presente documento si considera l'impiego del suddetto reagente nelle concentrazioni 4 M e 19 M, prendendo a riferimento le seguenti reazioni di neutralizzazione:



⁷ Risultato ricavato dalle attività di caratterizzazione eseguite presso Saluggia.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Neutralizzazione corrente acida con soda 4 M e 19 M

Nella Tabella 10 si riportano le valutazioni relative alla corrente acida, sia in caso di neutralizzazione con soda 4 M che in quello di neutralizzazione con soda 19 M.

Tabella 10 - Neutralizzazione corrente acida di riferimento con soda 4 M e soda 19 M

		NaOH 4 M	NaOH 19 M
Volume rifiuto iniziale	[l]	10,0	10,0
Massa U	[g]	1.200	1.200
Concentrazione U	[g/l]	120,0	
	[mol/l]	0,504	
Concentrazione UO ₂ (NO ₃) ₂	[mol/l]	0,504	
	[g/l]	199	
Concentrazione HNO ₃ nel rifiuto	[mol/l]	4,6	
NaOH - reazione 1	[mol/l]	4,6	
NaOH - reazione 2	[mol/l]	1,51	
NaOH totale	[mol/l]	6,11	6,11
	[l]	15,3	3,2
Volume finale soluzione alcalinizzata	[l]	25,3	13,2
Concentrazione U - rifiuto alcalinizzato	[g/l]	47,5	91
Incremento di volume	-	153%	32%

La neutralizzazione della corrente acida di riferimento, con soda 4 M, comporta un incremento di volume pari al 153%, contro un incremento pari al 32% nel caso di utilizzo di soda 19 M.

4.6.2.1 Valutazione dell'incremento di temperatura associato alla neutralizzazione

Si è inoltre stimato, per i due casi di neutralizzazione considerati, l'incremento massimo di temperatura raggiunto durante il suddetto processo. Il calcolo fa riferimento a condizioni teoriche conservative adiabatiche.

Le reazioni di neutralizzazione prese in considerazione, data la natura dei rifiuti, sono quelle già riportate in precedenza (paragrafo 4.6.2).

In base alla legge di Hess è possibile calcolare i ΔH_r (variazione dell'entalpia di reazione) per le due reazioni.

La legge di Hess stabilisce che, in condizioni isobare, il calore sviluppato in una reazione chimica è indipendente dagli stati intermedi attraverso i quali si evolve il sistema e dipende solo dal suo stato iniziale e finale.

Ciò comporta che la variazione di entalpia di una reazione, che può essere scomposta idealmente in più reazioni parziali, è pari alla somma algebrica delle variazioni di entalpia dei singoli stadi.

La legge di Hess può pertanto essere esplicitata come di seguito:

$$\Delta H_{\text{reazione}}^{\circ} = \sum \Delta H_{f(\text{prodotti})}^{\circ} - \sum \Delta H_{f(\text{reagenti})}^{\circ}$$

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Dove:

$\sum \Delta H_f^{\circ}(\text{prodotti})$ è la sommatoria delle entalpie standard di formazione dei prodotti.

$\sum \Delta H_f^{\circ}(\text{reagenti})$ è la sommatoria delle entalpie standard di formazione dei reagenti.

In aggiunta al calore di reazione si è anche considerato il contributo del calore di diluizione dell'idrossido di sodio alimentato in soluzione.

Come base di calcolo, per la corrente acida in esame, si è considerato un volume iniziale di rifiuto liquido sottoposto a neutralizzazione, pari a 10 litri. Nel caso di utilizzo di soda 4 M, ciò comporterà l'ottenimento di un volume di rifiuto neutralizzato pari a circa 25 litri, mentre nel caso di utilizzo di soda 19 M si arriverà ad un volume di rifiuto neutralizzato pari a circa 13 litri.

L'incremento di temperatura dovuto alle reazioni di alcalinizzazione si ricava dall'equazione $Q = c_p \times m \times \Delta T$.

Ai fini di una valutazione conservativa, considerando che la salinità comporta una riduzione del calore specifico, si è eseguito il calcolo in condizioni prossime alla saturazione della soluzione neutralizzata assumendo un c_p pari a 0,82 cal/g°C.

I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 11:

Tabella 11 - Incremento di Temperatura nel processo di neutralizzazione della corrente acida di riferimento

		NaOH 4 M	NaOH 19 M
Reazione 1	ΔH° [kcal]	-996	-996
	ΔT [°C]	39,7	67,7
Reazione 2	ΔH° [kcal]	-181,53	-181,53
	ΔT [°C]	7,2	12,3
Diluizione	ΔH° [kcal]	1,03	2,55
	ΔT [°C]	0,04	0,17
ΔT totale [°C]		47	80,2

Le prescrizioni tecniche vigenti di impianto prevedono che l'atmosfera all'interno delle SaG e tutte le parti accessibili con i guanti non superino un valore di temperatura pari a 50°C.

In entrambi i casi sopra riportati, supponendo di alimentare i reagenti a temperatura ambiente (20°C), teoricamente si avrebbe il superamento di tale soglia.

Si ribadisce infatti che il calcolo si riferisce a condizioni teoriche conservative adiabatiche.

La soda sarà inoltre alimentata gradualmente al sistema, mediante pompa dosatrice a portata variabile. Il serbatoio di neutralizzazione sarà per di più dotato di una sonda di temperatura che, in caso di superamento di un valore di T preimpostato (< 50°C), comanderà l'arresto immediato della pompa di alimentazione.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



4.6.3 Ricette di cementazione e bilancio di materia per singolo fusto cilindrico

Il manufatto finale prodotto dall'impianto di cementazione sarà costituito dal rifiuto radioattivo condizionato in matrice cementizia in forma omogenea (waste-form), e da un fusto cilindrico in acciaio inossidabile di volume interno utile circa pari a 20 litri in cui la matrice stessa sarà contenuta. Nei seguenti paragrafi, nei quali vengono illustrate le ricette di cementazione ipotizzate per la corrente acida di riferimento, si è assunto l'utilizzo di circa 1 litro di acqua per il lavaggio della linea di adduzione del rifiuto neutralizzato al fusto. Tale quantità d'acqua dovrà, infatti, essere computata nel calcolo del quantitativo totale di cemento, da utilizzare nel processo di cementazione.

La densità finale della forma del rifiuto cementato è stata assunta conservativamente pari a 1.800 kg/m³.

Corrente acida di riferimento neutralizzata con soda 4 M

Dalla neutralizzazione della corrente acida (72 litri complessivi) con NaOH 4 M si ottengono circa 182 litri di soluzione alcalinizzata caratterizzata da una concentrazione di U pari a 47,5 g/l ed una densità stimata pari a 1,20 kg/l.

Nelle analisi e nei calcoli relativi ai bilanci di materia, di seguito riportati, si è ipotizzato un rapporto acqua/cemento (a/c) pari a 0,5 valore tipicamente utilizzato per garantire un giusto compromesso tra una buona lavorabilità dell'impasto e una buona resistenza meccanica della matrice prodotta (intervallo pratico 0,4 ÷ 0,6).

Per la cementazione di circa 10 litri di rifiuto neutralizzato, ottenuto a partire da circa 4 litri iniziali di rifiuto acido, si ottiene un volume utile interno del fusto cilindrico necessario a tale scopo circa pari a 18 litri.

La percentuale di inglobamento (in peso) di rifiuto neutralizzato nella matrice cementizia risulta essere circa pari al 38%, mentre quella del rifiuto iniziale (circa 4 litri) nella stessa matrice risulta essere circa pari al 16%.

Corrente acida di riferimento neutralizzata con soda 19 M

Dalla neutralizzazione della corrente acida (72 litri complessivi) con NaOH 19 M si ottengono circa 95 litri di soluzione alcalinizzata caratterizzata da una concentrazione di U pari a 91 g/l ed una densità stimata pari a 1,35 kg/l.

Nelle analisi e nei calcoli relativi ai bilanci di materia, di seguito riportati, si è ipotizzato un rapporto acqua/cemento (a/c) pari a 0,5 valore tipicamente utilizzato per garantire un giusto compromesso tra una buona lavorabilità dell'impasto e una buona resistenza meccanica della matrice prodotta (intervallo pratico 0,4 ÷ 0,6).

Per la cementazione di circa 10 litri di rifiuto neutralizzato, ottenuto a partire da circa 8 litri iniziali di rifiuto acido, si ottiene un volume utile interno del fusto cilindrico necessario a tale scopo circa pari a 16,5 litri.

La percentuale di inglobamento (in peso) di rifiuto neutralizzato nella matrice cementizia

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



risulta essere circa pari al 46%, mentre quella del rifiuto iniziale (circa 8 litri) nella stessa matrice risulta essere circa pari al 33%.

Si riportano, nella Tabella 12, i principali valori relativi al bilancio di materia del singolo fusto cilindrico, per la corrente acida di riferimento, neutralizzata con NaOH 4 M o 19 M e condizionata con la ricetta di cementazione suddetta.

Tabella 12 - Bilancio di materia per singolo fusto cilindrico (corrente acida di riferimento)

		NaOH4 M	NaOH19 M
Volume rifiuto acido iniziale	[l]	4	7,6
Densità rifiuto liquido acquoso acido	[kg/l]	1,29	
Massa rifiuto liquido acquoso acido	[kg]	5,1	9,7
Volume rifiuto neutralizzato	[l]	10,0	10,0
Densità rifiuto neutralizzato	[kg/l]	1,2	1,35
Massa rifiuto neutralizzato	[kg]	12,0	13,5
Rapporto acqua/cemento	-	0,5	
Rapporto rifiuto neutralizzato/cemento	-	0,72	1,03
Acqua di lavaggio	[l]	1	
Massa totale cemento	[kg]	18,8	15,1
Massa totale forma del rifiuto cementato	[kg]	31,85	29,52
Densità forma del rifiuto cementato	[kg/l]	1,8	
V _{utile}	[l]	17,7	16,4
Inglobamento rifiuto neutralizzato (% in peso)	-	38%	46%
Inglobamento rifiuto acido iniziale (% in peso)	-	16%	33%

Si sottolinea, come il volume utile interno del fustino cilindrico dovrà tenere conto anche del volume occupato dalla girante interna ed essere calcolato fino al punto più alto della struttura miscelatrice, corrispondente al livello massimo di riempimento previsto.

4.6.4 Numero di fusti prodotti

Per quanto riguarda la cementazione della corrente acida di riferimento (72 litri complessivi), nel caso di neutralizzazione con NaOH 4 M, e supponendo di avere a disposizione un fusto cilindrico caratterizzato da un volume interno utile pari a 20 litri, saranno necessari 18 fusti CC-30.

Nel caso, invece, di neutralizzazione con NaOH 19 M, e supponendo di avere a disposizione un fusto cilindrico caratterizzato da un volume interno utile pari a circa 20 litri, saranno necessari 9 fusti CC-30.

4.6.5 Caratteristiche radiologiche dei manufatti prodotti

Come indicato nei paragrafi precedenti, all'interno di un manufatto cementato verranno inglobati, a seconda dell'utilizzo di NaOH 4 M o 19 M, rispettivamente circa 4 litri o circa 8 litri di rifiuto liquido acquoso appartenente alla corrente acida di riferimento.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Si riportano, nella Tabella 13 sottostante, i valori delle concentrazioni di Uranio, Plutonio e Americio caratterizzanti tale corrente.

Tabella 13 - Valori di riferimento per le concentrazioni di U, Pu e Am nella corrente acida di rifiuto

	Concentrazione media	Maggiorazione applicata	Concentrazione risultante
	[g/l]	-	[g/l]
U	94,5	≈ 20%	120,0
Pu	0,019		0,023
Am	0,0005		0,0006

Il batch di rifiuto da inviare a cementazione, viene, quindi, ipotizzato, in maniera conservativa, contenente un quantitativo superiore (circa del 20%) di Uranio, Plutonio e Americio, rispetto al batch che verrà presumibilmente condizionato nel processo reale.

Nei calcoli e nelle considerazioni seguenti, si considererà il manufatto prodotto a seguito della cementazione omogenea del batch da circa 8 litri di rifiuto acido neutralizzato con NaOH 19 M. Tale batch di rifiuto neutralizzato, massimizza, infatti, il quantitativo di radioisotopi che potranno essere cementati nel fusto CC-30 a disposizione (maggiore concentrazione dei radioisotopi nel manufatto finale prodotto).

Nella Tabella 14 si riporta l'inventario radioisotopico relativo al batch appena descritto (al 31/12/2014) e la concentrazione di attività, per ciascun radioisotopo, nella forma del rifiuto cementato. Per la composizione isotopica del Plutonio è stata considerata la composizione media d'impianto; per quanto riguarda, invece, l'Uranio, è stata considerata la composizione dell'Uranio naturale. La concentrazione dell'Americio coincide con quella dell'Am-241.

Tabella 14 - Inventario radioisotopico e concentrazione di attività nel batch di corrente acida condizionato

	Concentrazione [g/l]	Massa [g]	Attività [Bq]	Concentrazione di Attività nel manufatto [Bq/g]	Limite per LLW (D.M. 07/08/2015 ⁸) [Bq/g]
Pu-238	-	2,26E-04	1,44E+08	4,86E+03	<ul style="list-style-type: none"> • Radionuclidi a vita breve ≤ 5 MBq/g • Ni59-Ni63 ≤ 40 kBq/g • Radionuclidi a lunga vita ≤ 400 Bq/g
Pu-239		1,42E-01	3,27E+08	1,11E+04	
Pu-240		2,63E-02	2,21E+08	7,48E+03	
Pu-241		6,39E-04	2,44E+09	8,28E+04	
Pu-242		7,56E-04	1,11E+05	3,75E+00	
TOTALE Pu	0,023	1,70E-01	3,14E+09	1,06E+05	
U-235	-	6,54E+00	5,23E+05	1,77E+01	
U-238		9,01E+02	1,12E+07	3,80E+02	
TOTALE U		120,0	9,08E+02	1,17E+07	
Am-241	0,0006	4,37E-03	5,56E+08	1,88E+04	
TOTALE			3,70E+09	1,25E+05	

⁸ Per LLW si intende rifiuto radioattivo di bassa attività.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Dalla Tabella 14 si può notare che, sulla base delle ipotesi di condizionamento di cui ai paragrafi precedenti, i rifiuti sono preliminarmente classificabili come "Rifiuti Radioattivi di media attività" ai sensi del Decreto di cui al riferimento [N1], in quanto le concentrazioni di attività dei singoli radionuclidi superano i limiti indicati per i rifiuti radioattivi di bassa attività (LLW).

I manufatti che verranno prodotti dalla cementazione della corrente acida di riferimento (opportunamente neutralizzata ipotizzando, conservativamente, l'utilizzo di NaOH 19 M), sono da classificare come manufatti di Categoria 3 sulla base della classificazione indicata nella Normativa UNI-10621 ([N4]), sostanzialmente sia a causa delle elevate concentrazioni di α -emettitori.

4.6.6 Classificazione ai fini del trasporto del rifiuto condizionato

Il rifiuto condizionato all'interno della matrice cementizia può essere classificato, ai sensi dei par. 226 e 408 della IAEA SSR-6 [N3], come materiale LSA III.

Infatti, per tale classificazione, si richiede che il materiale solido (escluso ogni schermo), nel quale l'attività è completamente e uniformemente distribuita, presenti un'attività specifica media stimata non superiore a $2 \times 10^{-3} A_2/g$.

Presentando il rifiuto in considerazione, una miscela di radioisotopi, il valore di riferimento per A_2 (della miscela) deve essere ricavato dalla seguente formula (vedi par. 405 della IAEA SSR-6).

$$X_m = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}}$$

dove:

- $f(i)$ è la frazione di attività o di concentrazione di attività del radionuclide i nel miscuglio;
- $X(i)$ è l'appropriato valore di A_2 relativo al singolo radionuclide i ;
- X_m è il valore calcolato di A_2 , nel caso di una miscela di radionuclidi.

Nella Tabella 15 si riportano le valutazioni numeriche per il calcolo del valore di A_2 (X_m)⁹ per il miscuglio di radionuclidi in esame, sulla base dell'attività massima che può essere presente in un manufatto prodotto dalla cementazione di circa 8 litri di corrente acida, descritta in precedenza e neutralizzata (ipotesi conservativa) con soda 19 M.

⁹ Vedi par. 201 e Tabella 2 della sezione IV della IAEA SSR-6 [N2].

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Tabella 15 - Determinazione del valore di A_2 (X_m) del rifiuto condizionato (batch da circa 8 litri di corrente acida, neutralizzata con NaOH 19 M)

Radionuclidi	Attività [TBq]	f(i)	A_2 [X(i)] [TBq]	f(i)/X(i) [TBq ⁻¹]
Pu-238	1,44E-04	3,88E-02	1,00E-03	3,88E+01
Pu-239	3,27E-04	8,84E-02	1,00E-03	8,84E+01
Pu-240	2,21E-04	5,96E-02	1,00E-03	5,96E+01
Pu-241	2,44E-03	6,60E-01	6,00E-02	1,10E+01
Pu-242	1,11E-07	2,99E-05	1,00E-03	2,99E-02
U-235	5,23E-07	1,41E-04	Illimitato	0,00E+00
U-238	1,12E-05	3,03E-03	Illimitato	0,00E+00
Am-241	5,56E-04	1,50E-01	1,00E-03	1,50E+02
Totale	3,70E-03			
			$\sum_i f(i)/X(i)$	3,48E+02

Con i valori presenti in Tabella 15 si ricava:

$$A_2 = X_m = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}} = 2,87 * 10^{-3} TBq$$

da cui il limite per LSA III risulta

$$\frac{2 * 10^{-3} * A_2}{g} = 5,75 * 10^{-6} \frac{TBq}{g}$$

Il valore massimo dell'attività specifica nella matrice cementizia proveniente dalla cementazione del batch da circa 8 litri, descritto in precedenza e relativo alla corrente acida di riferimento (neutralizzata con NaOH 19 M), è uguale a 1,25E-07 TBq/g (si veda, a tal proposito, la Tabella 14).

Essendo tale valore inferiore al limite calcolato per LSA III, il rifiuto condizionato ricade in tale tipologia per la classificazione secondo la Normativa sul trasporto IAEA [N3].

Inoltre, il quantitativo di attività contenuta all'interno della matrice di cementizia è tale da dar luogo ad un rateo di dose massimo a tre metri dalla matrice (senza considerare la presenza di elementi schermanti e dello spessore in acciaio del fusto cilindrico stesso) decisamente inferiore ai 10 mSv/h, imposti dalla stessa normativa IAEA.

In considerazione di tali caratteristiche della matrice, è ammesso il suo trasporto utilizzando un collo di tipo IP II, in condizioni di uso esclusivo.

Sul fusto verranno condotte le prove necessarie per dimostrare il rispetto di tutti i requisiti definiti dalla normativa sul trasporto IAEA SSR-6 [N3], necessari per ottenere la qualifica come collo di tipo IP II e per rispettare i vincoli di dose, a contatto e a 1 metro, definiti dalla normativa IAEA stessa.

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Ciò permetterà di trasportare i manufatti prodotti al Deposito Nazionale, quando questo sarà disponibile, senza necessità di utilizzo di ulteriori contenitori da trasporto (a meno di esigenze e/o richieste diverse da parte del Deposito Nazionale stesso).

4.6.7 Conclusioni

In base alle considerazioni di cui ai paragrafi precedenti si può concludere che:

- ✓ La neutralizzazione della corrente acida di rifiuto comporta un incremento di volume rispettivamente pari al 153% e al 32% nel caso di utilizzo di soda 4 M e 19 M come agente neutralizzante.
- ✓ La neutralizzazione della corrente acida di rifiuto stoccata presso IPU comporta un incremento massimo di temperatura circa pari a 80°C. Tale incremento è stato calcolato considerando la neutralizzazione di 10 litri appartenenti alla corrente acida di riferimento con soda 19 M ed è tale da superare, teoricamente, il valore limite di 50°C prescritto come soglia massima di temperatura raggiungibile all'interno delle SaG.
Si ribadisce che il calcolo si riferisce a condizioni teoriche conservative adiabatiche. La soda sarà inoltre alimentata gradualmente al sistema, mediante pompa dosatrice a portata variabile. Il serbatoio di reazione sarà per di più dotato di una sonda di temperatura che, in caso di superamento di un valore di T preimpostato (< 50°C), comanderà l'arresto immediato della pompa di alimentazione.
- ✓ Nel caso di neutralizzazione con soda 4 M, dello stesso quantitativo e della stessa tipologia di soluzione acida, l'incremento di temperatura risulta inferiore (circa pari a 47°C).
- ✓ Per la cementazione di un batch da circa 10 litri di rifiuto neutralizzato (costituito da circa 4 litri iniziali di soluzione acida, neutralizzata con NaOH 4 M o da circa 8 litri iniziali di soluzione acida, neutralizzata con NaOH 19 M) è necessario un volume utile del fusto cilindrico di poco inferiore ai 20 litri e un quantitativo totale di cemento di poco inferiore ai 20kg.
- ✓ Nel caso di neutralizzazione della corrente acida di riferimento con NaOH 4 M, supponendo di avere a disposizione un fusto cilindrico caratterizzato da un volume interno utile circa pari a 20 litri, saranno necessari 18 fusti CC-30.
- ✓ Nel caso di neutralizzazione della corrente acida di riferimento con NaOH 19 M, supponendo di avere a disposizione un fusto cilindrico caratterizzato da un volume interno utile circa pari a 20 litri, saranno necessari 9 fusti CC-30.
- ✓ Il serbatoio di neutralizzazione del rifiuto liquido dovrà avere un volume utile di almeno 20 litri in modo da consentire la neutralizzazione di almeno 1 batch di rifiuto

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



da neutralizzare con NaOH 19M e almeno 2 batch da neutralizzare con NaOH 4M.

- ✓ Sulla base delle ipotesi di condizionamento adottate i rifiuti sono classificabili come “Rifiuti Radioattivi di Media Attività” ai sensi del [N1];
- ✓ I manufatti che verranno prodotti dalla cementazione dei batch da circa 4 litri o da circa 8 litri di soluzione acida (neutralizzata rispettivamente con soda 4 M o soda 19 M), sono da classificare come manufatti di Categoria 3 principalmente a causa delle elevate concentrazioni di α -emettitori e di Pu-241 presenti in essi, secondo i riferimenti [R1] e [N4].
- ✓ Per quanto riguarda la classificazione dei manufatti ai fini del trasporto, il materiale contenuto all'interno del fusto cilindrico CC-30, a seguito del processo di condizionamento (costituito quindi dal rifiuto condizionato in forma omogenea in matrice cementizia), è classificabile come materiale LSA III e trasportabile, quindi, in contenitori di tipo IP II, in condizioni di uso esclusivo. È stato inoltre verificato il rispetto del limite di rateo di dose a 3 m dal materiale nudo, risultando un valore di rateo di dose decisamente inferiore al limite di 10 mSv/h imposto dalla normativa IAEA suddetta ([N3]).

Nella Tabella 16 si riporta uno schema riassuntivo dei bilanci di materia, suddiviso per fase di trattamento e per tipologia di rifiuto liquido.

Documento prelevato da Cerreto Antonio il 19/10/2015 15:55
Il sistema informatico prevede la firma elettronica pertanto l'indicazione delle strutture e dei nominativi delle persone associate certifica l'avvenuto controllo. Elaborato del 16/10/2015 Pag. 28 di 29 PU RL 00009 rev. 02 Autorizzato

Relazione Tecnica	ELABORATO PU RL 00009
Bilanci di materia e caratteristiche del fusto cementato	REVISIONE 02



Tabella 16 – Schema riassuntivo dei bilanci di materia, suddiviso per fase di trattamento e per tipologia di rifiuto liquido

