

C0	31/08/10	Emissione per approvazione	DV	DL	LM	
REVISIONE	DESCRIZIONE			EL.	CON.	APP.

**MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI
MAGISTRATO ALLE ACQUE**

**NUOVI INTERVENTI PER LA SALVAGUARDIA
DI VENEZIA**

LEGGE N.798 DEL 29-11-1984
 CONVENZIONE REP. N. 7191 DEL 04-10-1991
 ATTO ATTUATIVO REP. ~~8100~~ del ~~19-12-2005~~ (PROGETTAZIONE)
 8245 3-12-2007

**INTERVENTI ALLE BOCCHE LAGUNARI PER
LA REGOLAZIONE DEI FLUSSI DI MAREA**
 CUP: D51B02000050001

PROGETTO ESECUTIVO

**WBS: LN.I1.48
WBE: LN.I1.48.PE.03**

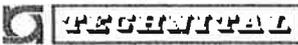
**BOCCA DI LIDO SAN NICOLÒ – PARATOIE E CONNETTORI
PARATOIE
PROTEZIONE CADODICA
DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI
RELAZIONE DI CALCOLO**

ELABORATO D. Varisco	CONTROLLATO D. Lesina	APPROVATO L. Malzac
N. ELABORATO MV082P-PE-NAR-2010-C0	CODICE FILE MV082P-PE-NAR-2010-C0.doc	DATA 31 Agosto 2010

CONSORZIO “VENEZIA NUOVA”

COORDINAMENTO PROGETTAZIONE
 VERIFICATO: **S. PASTORE**
 CONTROLLATO: **M. BROTTO**
CONSORZIO VENEZIA NUOVA
M. BROTTO

PROGETTAZIONE
ING. A. SCOTTI
IL RESPONSABILE
PROGETTAZIONE SPECIALISTICA


	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 2
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

INDICE

1.	OGGETTO E SCOPO	3
2.	RIFERIMENTI	5
2.1.	Elaborati del progetto esecutivo	5
3.	DATI GENERALI	7
3.1.	Durata prevista	7
3.2.	Dati relativi all'acqua di mare	7
4.	DATI DI PROGETTO DELLA PROTEZIONE CATODICA	8
4.1.	Caratteristiche principali dell'anodo sacrificale	8
4.1.1.	Materiale	8
4.1.2.	Tipo	8
4.1.3.	Massa	9
4.1.4.	Dimensioni principali	9
4.1.5.	Proprietà elettrochimiche	9
4.2.	Potenziale di protezione	9
4.3.	Densità di corrente di protezione	9
5.	CRITERI DI PROGETTO DELLA PROTEZIONE CATODICA	12
5.1.	Geometria dell'anodo sacrificale	12
5.2.	Resistenza dell'anodo	12
5.3.	Corrente erogata dall'anodo	13
5.4.	Richiesta di corrente di protezione	13
5.5.	Numero di anodi	14
6.	RISULTATI FINALI	15

 PROTECTOR	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 3
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

1. OGGETTO E SCOPO

La presente relazione riporta il calcolo dettagliato del minimo numero di anodi sacrificali necessari per sviluppare una adeguata protezione catodica per gli elementi strutturali della paratoia.

Le caratteristiche geometriche principali della paratoia sono:

- lunghezza totale 26.70 [m]
- lunghezza da asse cerniere 26.05 [m]
- larghezza massima 19.92 [m]
- larghezza in punta 19.86 [m]
- lunghezza rastremazione (dalla punta) 13.95 [m]
- altezza 4.00 [m]
- distanza asse cerniere da superficie superiore 0.80 [m]

La struttura è costituita da fasciami in lamiera supportati e irrigiditi da elementi strutturali secondari, detti correnti e realizzati con profilati a bulbo, sostenuti a loro volta da telai trasversali, detti ossature rinforzate, realizzati con travi composte e raccordate con squadre d'angolo.

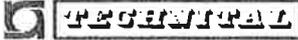
Le travi rinforzate trasversali sono sostenute da tre linee di puntellatura longitudinali: due in corrispondenza degli elementi strutturali relativi alle cerniere, realizzate con una paratia forata, e una centrale realizzata con puntelli.

I fasciami frontale e posteriore sono irrigiditi e sostenuti da elementi di rinforzo verticali, realizzati con profili a bulbo, con le estremità collegate con squadre ai corrispondenti correnti superiore e inferiore.

I correnti dei fasciami laterali sono collegati con squadre al primo corrente verticale dei fasciami frontale e posteriore.

I correnti longitudinali e verticali sono disposti con un intervallo d'ossatura tipico di 625 mm.

I telai trasversali rinforzati e i relativi elementi di puntellatura sono disposti a intervalli di 2000/2500 mm.

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 4
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

I correnti non vengono interrotti in corrispondenza di ogni telaio trasversale, ma sono continui attraverso intagli, di geometria opportuna, nell'anima delle travi rinforzate mantenendo il collegamento con l'anima stessa.

Le paratie longitudinali laterali sono opportunamente rinforzate in corrispondenza dei fori per i perni dei gruppi cerniera-connettore e dei punti di aggancio dei dispositivi per il sollevamento della paratoia.

La paratoia è leggermente rastremata sui fianchi, circa dalla metà della lunghezza fino alla punta, mediante deviazione dei fasciami laterali, fino a un massimo di 30 mm per lato; l'entità della riduzione è irrilevante ai fini delle verifiche.

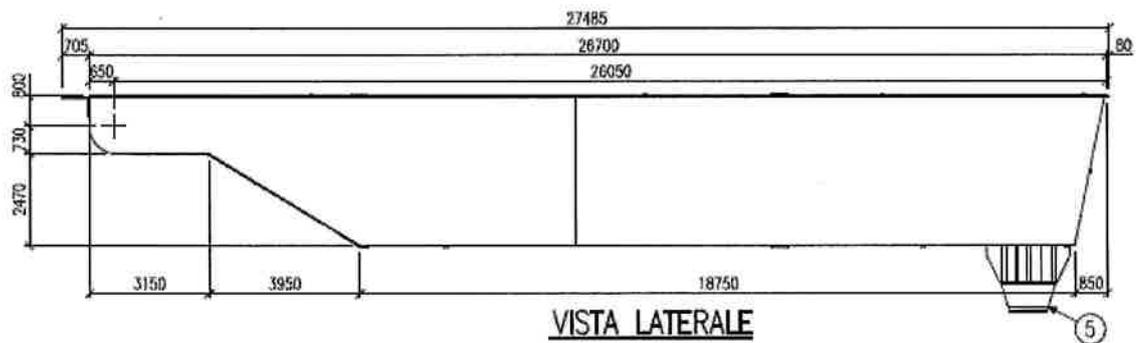


FIG. 1.1 – PARATOIA – VISTA LATERALE

Nel calcolo dettagliato degli anodi sacrificali le superfici degli elementi costituenti la struttura e l'allestimento della paratoia sono state divise secondo il seguente criterio:

- Area esterna della paratoia = 1.713 m²
- Area interna della paratoia = 3.825 m²

Il calcolo è eseguito con riferimento alle norme DNV RP B401 “Cathodic Protection Design”.

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 5
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

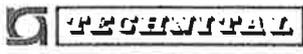
2. RIFERIMENTI

2.1. Elaborati del progetto esecutivo

La presente relazione fa riferimento ai seguenti documenti:

DISEGNI		
/1/	MV082P-PE-NAD-2007	ASSIEME STRUTTURALE
/2/	MV082P-PE-NAD-2010	STRUTTURA PRINCIPALE – FASCIAME SUPERIORE
/3/	MV082P-PE-NAD-2011	STRUTTURA PRINCIPALE – FASCIAME INFERIORE
/4/	MV082P-PE-NAD-2012	STRUTTURA PRINCIPALE – FASCIAME LATERALE
/5/	MV082P-PE-NAD-2013	STRUTTURA PRINCIPALE – FASCIAME FRONTALE E POSTERIORE
/6/	MV082P-PE-NAD-2020	STRUTTURA PRINCIPALE – PARATIA LONGITUDINALE IN ASSE CERNIERA
/7/	MV082P-PE-NAD-2030	STRUTTURA PRINCIPALE – LINEA DI PUNTELLATURA TAV. 1
/8/	MV082P-PE-NAD-2031	STRUTTURA PRINCIPALE – LINEA DI PUNTELLATURA TAV. 2
/9/	MV082P-PE-NAD-2032	STRUTTURA PRINCIPALE – DETTAGLI PUNTELLATURE TAV. 1
/10/	MV082P-PE-NAD-2033	STRUTTURA PRINCIPALE – DETTAGLI PUNTELLATURE TAV. 2
/11/	MV082P-PE-NAD-2040	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONI TRASVERSALI ORDINARIE
/12/	MV082P-PE-NAD-2041	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE LONGITUDINALE ORDINARIA
/13/	MV082P-PE-NAD-2042	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE ORIZZONTALE ORDINARIA
/14/	MV082P-PE-NAD-2050	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 2
/15/	MV082P-PE-NAD-2051	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 3

/16/	MV082P-PE-NAD-2052	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 4
/17/	MV082P-PE-NAD-2053	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 5
/18/	MV082P-PE-NAD-2054	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 6
/19/	MV082P-PE-NAD-2055	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 7
/20/	MV082P-PE-NAD-2056	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 8
/21/	MV082P-PE-NAD-2057	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 9
/22/	MV082P-PE-NAD-2058	STRUTTURA PRINCIPALE – SEZIONE TRASVERSALE N. 10
/23/	MV082P-PE-NAD-2070	STRUTTURA PRINCIPALE - DETTAGLI INTERFACCIA CERNIERE TAV. 1
/24/	MV082P-PE-NAD-2071	STRUTTURA PRINCIPALE - DETTAGLI INTERFACCIA CERNIERE TAV. 2
/25/	MV082P-PE-NAD-2090	DETTAGLI PUNTI DI SOSPENSIONE POSTERIORI
/26/	MV082P-PE-NAD-2091	DETTAGLI PUNTI DI SOSPENSIONE ANTERIORI
/27/	MV082P-PE-NAD-2200	PIANO GENERALE TAV.1
/28/	MV082P-PE-NAD-2201	PIANO GENERALE TAV.2
/29/	MV082P-PE-NAD-2280	ALLESTIMENTO - PROTEZIONE CATODICA - ANODI ESTERNI
/30/	MV082P-PE-NAD-2285	ALLESTIMENTO - PROTEZIONE CATODICA - ANODI INTERNI
/31/	MV082P-PE-NAD-2290	ALLESTIMENTO - PROTEZIONE CATODICA - DETTAGLI ANODI ESTERNI E CONNESSIONI
/32/	MV082P-PE-NAD-2291	ALLESTIMENTO - PROTEZIONE CATODICA - DETTAGLI ANODI INTERNI E CONNESSIONI

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 7
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

3. DATI GENERALI

3.1. Durata prevista

Nel calcolo, in accordo con gli interventi quinquennali di ispezione e manutenzione, è stata considerata la durata di anodi e di pittura protettiva come di seguito specificato:

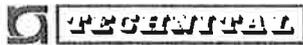
- Superficie esterna 5 anni
- Superficie interna 10 anni

Per la superficie esterna si prevedono sia il rifacimento del rivestimento sia la sostituzione degli anodi in corrispondenza di ogni ispezione quinquennale.

Per la superficie interna, la necessità di erogare elevate densità di corrente in presenza di condizioni anaerobiche richiede un numero elevato di anodi, il cui consumo in soli 5 anni sarebbe troppo basso. Si prevede quindi la sostituzione degli anodi ed il rifacimento del rivestimento ogni 10 anni, mentre l'ispezione ed il controllo avverranno sempre ogni 5 anni.

3.2. Dati relativi all'acqua di mare

Si assume una resistività (ρ) di 0.20 Ohm.m.

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 8
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

4. DATI DI PROGETTO DELLA PROTEZIONE CATODICA

4.1. Caratteristiche principali dell'anodo sacrificale

4.1.1. Materiale

E' previsto l'utilizzo di anodi sacrificali di zinco conforme a US Specification MIL-A-18001J, con la seguente composizione chimica:

- Cu 0.005 % max
- Fe 0.005 % max
- Pb 0.006 % max
- Si 0.125 % max
- Al 0.10 – 0.50 %
- Cd 0.027 – 0.07 %

4.1.2. Tipo

Sono previsti anodi piatti, montati mediante bullonatura. Gli anodi hanno dimensioni e masse adeguate alle diverse sistemazioni su superfici interne (tipo AI1 e AI2) ed esterne (tipo AE1).

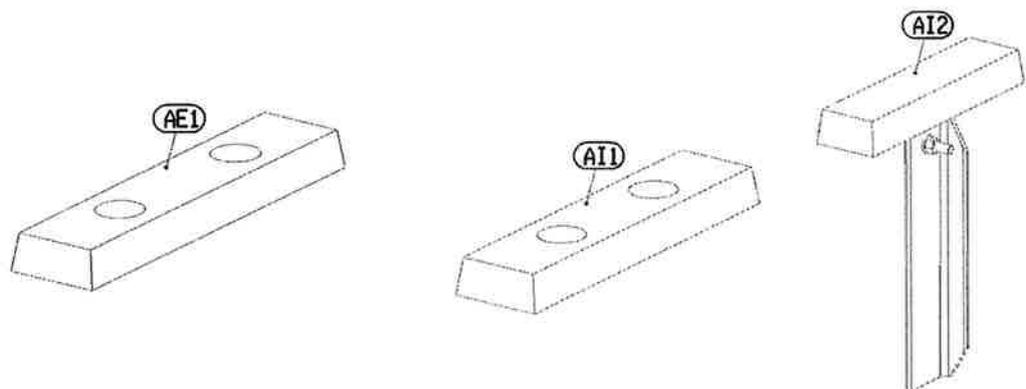


FIG. 4.1 – TIPO DI ANODI

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 9
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

4.1.3. Massa

Massa netta di ciascun anodo per superfici esterne, tipo AE1: 17.3 kg

Massa netta di ciascun anodo per superfici interne,

Tipo AI1 (tutte le superfici interne escluso il fondo paratoia) 6.5 kg

Tipo AI2 (superficie del fondo paratoia) 9.4 kg

4.1.4. Dimensioni principali

Anodo per superfici esterne Tipo AE1: 490 mm * 120 mm * 50 mm

Anodi per superfici interne Tipo AI1: 300 mm * 80 mm * 45 mm

Anodi per superfici interne Tipo AI2: 330 mm * 85 mm * 45 mm

4.1.5. Proprietà elettrochimiche

- Efficienza elettrochimica (ϵ) 750 Ah/kg
- Potenziale dell'anodo a circuito chiuso (E_a^0) -1.050 mV vs Ag/AgCl

4.2. **Potenziale di protezione**

Il potenziale di protezione è pari a -900 mV vs Ag/AgCl per la possibilità che si instauri un ambiente anaerobico nelle superfici interne e localmente nelle superfici esterne al di sotto del macrofouling.

4.3. **Densità di corrente di protezione**

Durante la vita della paratoia, la densità di corrente di protezione varia poiché la formazione di depositi calcarei riduce la domanda di corrente. Nel dimensionamento del sistema di protezione catodica vengono utilizzate le seguenti densità di corrente di protezione:

- Iniziale: è la densità di corrente necessaria per ottenere la polarizzazione iniziale della struttura.

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 10
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

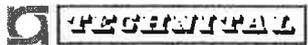
- **Media** (di mantenimento): è la densità di corrente richiesta per mantenere il livello di polarizzazione della struttura.
- **Finale** (ri-polarizzazione): è la densità di corrente richiesta per ottenere nuovamente la polarizzazione della struttura in seguito ad una operazione di pulizia.

Le densità di corrente di protezione (i_c) iniziale, media e finale di progetto sono determinate in accordo con le norme DNV RP B401 1993 ed i dati sperimentali citati nel documento VE4712-PMRF01:

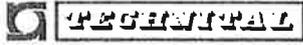
Area	Densità di corrente (mA/m ²)		
	Iniziale	Mantenimento	Finale
Superfici esterne	100	55	70
Superfici interne	200	50	200

La corrente di protezione viene determinata includendo anche il fattore di danneggiamento del rivestimento. Per effetto dell'invecchiamento della pittura e danneggiamenti meccanici, i difetti del rivestimento aumentano nel tempo. In accordo con esperienze su vernici nel campo marino e off-shore e le caratteristiche dei rivestimenti vengono adottati i seguenti fattori:

Danneggiamento del rivestimento	$f_{C,I}$ Iniziale	$f_{C,M}$ Medio	$f_{C,F}$ Finale
Superfici esterne <u>Vernice a base epossidica</u> , almeno 2 mani, NDFT minimo 375 microns <u>Rivestimento foul release</u> , preferibilmente minimo 2 mani, NDFT minimo 250 microns (su tutte le superfici esterne, eccetto il fasciame inferiore) <i>Durata prevista 5 anni</i>	2%	4%	6%

	Rev.	Data:	EI. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 11
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

Danneggiamento del rivestimento	$f_{C,I}$ Iniziale	$f_{C,M}$ Medio	$f_{C,F}$ Finale
Superfici interne <u>Vernice a base epossidica,</u> almeno 2 mani, NDFT minimo 375 microns <i>Durata prevista 10 anni</i>	2%	7%	10%

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 12
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

5. CRITERI DI PROGETTO DELLA PROTEZIONE CATODICA

5.1. Geometria dell'anodo sacrificale

Per l'anodo sulla superficie da proteggere si adotta un fattore di utilizzo (u) pari a 80%.

5.2. Resistenza dell'anodo

Formula per il calcolo della resistenza dell'anodo:

anodo montato sulla lamiera:
$$R_A = \frac{\rho}{(L + w_a)}$$

anodo montato su supporto:

se $L \geq 4r$:
$$R_A = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$$

se $L < 4r$:
$$R_A = \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ \ln \left[\frac{2L}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right) \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\}$$

dove:

ρ = resistività dell'ambiente Ωm

L = lunghezza dell'anodo m

w_a = larghezza dell'anodo m

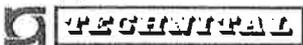
r = raggio dell'anodo m

se l'anodo non è cilindrico $r = \frac{\text{perimetro}}{2\pi}$

Per il calcolo della resistenza finale dell'anodo, la sua lunghezza finale è come segue:

$$L_F = L - 0.1 \times u \times L$$

La resistenza anodica è calcolata alle condizioni iniziali e alle condizioni finali in seguito ad una riduzione del volume dovuta al consumo calcolato in modo conservativo a mezzo del fattore di utilizzo (u) come segue:

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 13
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

volume (finale) = volume (iniziale) \times (1 - u)

lunghezza (finale) = lunghezza (iniziale) - $0.1 \times u \times L$

raggio equivalente (finale) = calcolato dalla lunghezza e volume finali

La forma finale dell'anodo ridotto si assume semicircolare per gli anodi montati sulla lamiera e circolare per quelli montati su supporto.

5.3. Corrente erogata dall'anodo

La corrente erogata da ciascun anodo è determinata dividendo il potenziale effettivo per la resistenza dell'anodo:

$$I_A = \frac{\Delta E}{R_A}$$

Dove ΔE è il potenziale effettivo = $E_P - E_A$ (potenziale di protezione – potenziale a circuito chiuso).

La corrente erogata è calcolata nelle condizioni iniziale e finale.

5.4. Richiesta di corrente di protezione

La richiesta di corrente di protezione totale è determinata come segue:

$$I = W_s \times f_c \times i_c$$

dove:

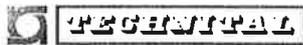
I = Corrente di protezione A

W_s = superficie totale da proteggere m^2

f_c = fattore di danneggiamento del rivestimento

i_c = densità di corrente di protezione necessaria A/m^2

La richiesta di corrente di protezione è calcolata nelle condizioni iniziale, finale (ri-polarizzazione) e media (mantenimento).

	Rev.	Data:	El. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 14
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

5.5. Numero di anodi

Il minimo numero di anodi necessario è calcolato in base alla richiesta di corrente di protezione ed alla durata come di seguito indicato.

Il numero di anodi necessario basato sulla richiesta di corrente di protezione (N_I) è dato da:

$$N_I = \max \left[N_{I,I} = \frac{I_{cI}}{I_{aI}}; N_{I,F} = \frac{I_{cF}}{I_{aF}} \right]$$

dove:

I_{cI} = richiesta di corrente di protezione iniziale A

I_{cF} = richiesta di corrente di ri-polarizzazione A

I_{aI} = corrente anodica erogata nella condizione iniziale A

I_{aF} = corrente anodica erogata nella condizione finale A

Il numero di anodi necessario basato sulla richiesta di massa (durata) (N_D) è dato da:

$$N_D = \frac{M}{m}$$

dove:

M = massa netta totale degli anodi kg

m = massa netta di un anodo kg

La massa totale degli anodi è data da:

$$M_T = \frac{I_M \times DL \times 8760}{u \times \varepsilon}$$

dove:

I_M = richiesta di corrente di protezione di mantenimento (media) A

DL = durata prevista degli anodi anni

u = fattore di utilizzo

ε = efficienza elettrochimica Ah/kg

Il numero di anodi finale N_A è il massimo tra N_I e N_D .

	Rev.	Data:	EI. MV082P-PE-NAR-2010-C0	Pag. n. 15
	Rev. C0	Data: 31/08/2010	PROTEZIONE CATODICA DIMENSIONAMENTO DEGLI ANODI	

6. RISULTATI FINALI

La tabella seguente riassume i risultati finali del numero di anodi necessario, calcolato con le superfici rilevate dai disegni di progetto esecutivo, in base alla corrente iniziale e di ri-polarizzazione ed in base alla durata garantendo la corrente di mantenimento di progetto:

Superficie	N. di anodi necessari	Massa netta necessaria (kg)	Tipo di anodo
Esterna	19	329	490x120x50
Interna (escluso fondo)	198	1 287	300x80x45
Interna (fondo)	79	743	330x85x45
Totale	296	2 359	

In aggiunta agli anodi indicati in tabella, sono stati aggiunti 2 anodi tipo AE1 in corrispondenza del connettore per proteggere le superfici della femmina e della forcina esposte all'acqua così come richiesto, all'interno dello "Studio B.7.03/II: Completamento della sperimentazione del gruppo cerniera-connettore delle paratoie e costruzione della preserie/II Fase", dal "Disciplinare Tecnico" della "Perizia di Variante e Suppletiva", documento MV078C-PE-MMR-1325-C0.

Inoltre per avere una distribuzione uniforme degli anodi sono stati aggiunti alcuni anodi rispetto a quelli calcolati.

Nella tabella seguente viene riportato il numero degli anodi utilizzato per la protezione della paratoia.

Superficie	N. di anodi necessari	Massa netta effettiva (kg)	Tipo di anodo
Esterna	24	415	490x120x50
Interna (escluso fondo)	198	1 287	300x80x45
Interna (fondo)	80	752	330x85x45
Totale	302	2 454	

Nelle successive tabelle si riporta il calcolo dettagliato per ogni tipo di anodo.

