



Ricerca di Sistema elettrico

Assemblato membrana-elettrodi per un elettrolizzatore a membrana a scambio anionico: progettazione del prototipo e analisi sperimentale in condizioni di esercizio

A. Pozio, F. Bozza, N. Lisi, R. Chierchia

ASSEMBLATO MEMBRANA-ELETTRODI PER UN ELETTROLIZZATORE A MEMBRANA A SCAMBIO ANIONICO:
PROGETTAZIONE DEL PROTOTIPO E ANALISI SPERIMENTALE IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO

A. Pozio, F. Bozza, N. Lisi, R. Chierchia (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: 1.2 Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti

Work package: 3 Power to gas

Linea di attività: 3.51 Realizzazione e testing dell'assemblato membrana-elettrodi per un elettrolizzatore con membrana a scambio anionico

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Work package: Luca Turchetti, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
2.1 MATERIALI.....	6
2.2 METODO DI DEPOSIZIONE PVD.....	6
2.3 METODO DI DEPOSIZIONE ELETTROFORETICA	7
2.4 METODO DI ELETTRO-DEPOSIZIONE.....	7
2.5 MISURE ELETTROCHIMICHE E CHIMICO FISICHE	8
3 RISULTATI	11
3.1 ELETTRODI PRODOTTI PER PVD E PER ELETTRODEPOSIZIONE	11
3.2 CARATTERIZZAZIONE ELETTROCHIMICA DEGLI ELETTRODI.	14
3.3 TEST LUNGA DURATA ANODO SS/EPD-Co.	14
4 CONCLUSIONI.....	18
ALLEGATO 1 – PROGETTAZIONE CELLA ELETTROLISI	19
BIBLIOGRAFIA	19

Sommario

Proseguendo le linee di attività intraprese nel secondo anno [1], il lavoro di ricerca si è ulteriormente focalizzato sullo sviluppo di elettro-catalizzatori PGM-free per la reazione di produzione di idrogeno in condizioni alcaline attraverso la sintesi di substrati metallici rivestiti di catalizzatori (CCS).

La sperimentazione intrapresa sulla deposizione elettroforetica (EPD) [2,3] è stata conclusa attraverso la verifica delle prestazioni elettrochimiche nel tempo. Anodi prodotti attraverso rivestimento EPD sono stati assemblati a membrane anioniche commerciali e testati in un prototipo di cella alcalina in scala laboratorio (Allegato 1) ed analizzati per migliaia di ore in condizione di esercizio allo scopo di valutare la degradazione della capacità elettrocatalitica e della membrana in condizioni operative per utilizzo prolungato.

Uno dei problemi principali, infatti, è la perdita dell'attività catalitica per disattivazione del catalizzatore o per erosione dello stesso dal supporto.

In aggiunta, utilizzando come substrati, gli stessi setti porosi di fibre di acciaio commerciale (Bekaert) già utilizzati per la deposizione EPD sono stati prodotti nuovi elettrodi compositi con tecniche alternative tra cui PVD ed elettrodeposizione allo scopo di confrontare tecnologie diverse per la loro produzione con l'obiettivo di individuare la migliore tecnica di sintesi sia in termini di facilità che di costo.

In questo studio in particolare ci si è indirizzati sulla produzione di supporti rivestiti con cobalto e cobalto rame valutandone le prestazioni elettrochimiche. In parallelo è stata valutata l'ottimizzazione della tecnica PVD considerando diversi tempi di deposizione in rapporto sempre alle prestazioni elettrochimiche.

1 Introduzione

Tra gli obiettivi posti nell'ambito della ricerca sui materiali per elettrolizzatori a membrana anionica, una parte rilevante è quella della preparazione di elettrodi da interfacciare alle membrane anioniche. Allo stato attuale, la preparazione di questi elettrodi viene effettuata per deposizione spray di polveri di catalizzatori sia sulle membrane stesse che sui supporti portacorrente. La metodologia è complessa e, in termini di costi e tempi di produzione, non particolarmente vantaggiosa. Per tale ragione, si indagano altre tecniche di preparazione come, ad esempio, l'elettrodeposizione o la deposizione elettroforetica [4,5]. La deposizione elettroforetica ha dimostrato di essere un'ottima alternativa [1] che consente di ottenere anodi catalizzati con buone prestazioni.

Nel rapporto precedente, la tecnica EPD è stata ottimizzata in rapporto al bagno ed ai parametri di deposizione in modo tale da ottenere polveri di ossidi di cobalto commerciali su anodi in acciaio da inserire in celle di elettrolisi alcalina a membrana anionica. I risultati ottenuti hanno evidenziato una struttura acciaio/ossido di cobalto con caratteristiche diverse rispetto alla struttura di partenza. L'attività catalitica per l'OER è aumentata rispetto all'elettrodo di acciaio originale ed è simile a quella ottenuta su materiali di riferimento o con altre tecniche di deposizione.

Per completare il lavoro di caratterizzazione un test di elettrolisi di lunga durata (> 2000 h) è stato eseguito su una cella di elettrolisi da 2 cm² utilizzando un anodo EPD ottimizzato e un catodo in acciaio. I risultati sono soddisfacenti e indicano che la metodologia indagata consente di ottenere sistemi stabili nel tempo in condizioni operative.

In aggiunta al lavoro di caratterizzazione su EPD sono stati studiati sistemi anodici alternativi ottenuti per PVD e per elettrodeposizione. In particolare, quest'ultima tecnica è stata effettuata allo scopo di ottenere anche leghe miste del tipo M-Co e per valutarne le prestazioni elettrochimiche.

2 Descrizione delle attività svolte

2.1 Materiali

Il materiale di base utilizzato per le diverse tecniche di deposizione (EPD, PVD e ED) è sempre la matrice commerciale in fibra di metallo sinterizzato in acciaio AISI 316-L (Bekaert) di spessore 0,51 mm e con una porosità dell'82% già descritta nel precedente rapporto [1]

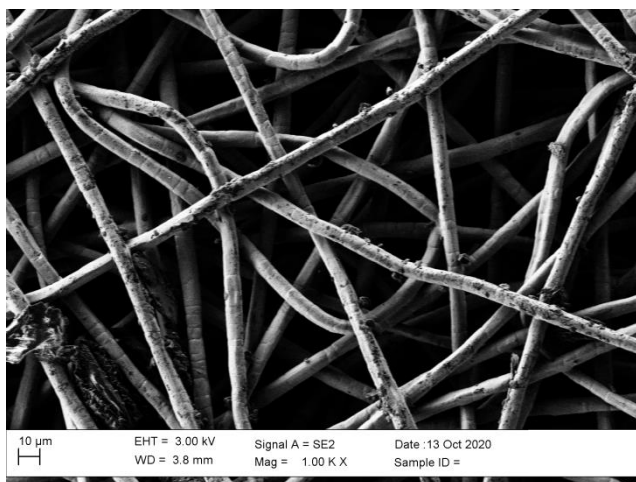


Figura 1. Immagine delle fibre in acciaio AISI 316L della struttura usata come materiale di base.

Questo materiale, si presta all'impiego negli elettrolizzatori alcalini a membrana in funzione di elettrodo/portacorrente sia al catodo che all'anodo essendo chimicamente stabile all'ambiente ossidante e riducente in condizioni di pH elevati. La sua porosità è un aspetto fondamentale in quanto garantisce il passaggio dei gas che si formano all'interfaccia membrana/elettrodo e il ricircolo dell'acqua/soluzione di alimentazione da eventuali serbatoi esterni. La tabella seguente mostra la composizione media dell'acciaio specificata. Come è noto Ni e Fe sono considerati catalizzatori validi nell'elettrolisi alcalina.

Tabella. 1- Composizione media acciaio AISI 316L (Bekaert).

%C: 0,024	%Mn: 0,360	%Si: 0,407
%P: 0,018	%S: 0,000	%N: 0,035
%Cr: 6,868	%Ni: 10,056	%Mo 2,532
%Fe: saldo		

La membrana anionica commerciale utilizzata nella prova in cella è la Fumasep FAA-3PK-130 (Fumatek) già caratterizzata in un precedente rapporto [1].

2.2 Metodo di deposizione PVD

I film spessi di cobalto e di ossido di cobalto sono stati depositati su substrati circolari di AISI 316 mediante sputtering a radiofrequenza utilizzando l'impianto MRC 8620 mostrato in figura 2.



Figura 2. Impianto MRC 8620 per la deposizione mediante PVD.

I film sono stati ottenuti a temperatura ambiente utilizzando una potenza della radiofrequenza pari a 100 W ed una pressione di lavoro pari a 0.53 Pa. Il flusso di Ar è stato mantenuto a 10 scc min^{-1} , mentre quello di ossigeno è stato fissato a 0, 0.5 e 5 scc min^{-1} , rispettivamente per i campioni 1, 2 e 3. I campioni hanno approssimativamente lo stesso spessore di circa 1 micron e sono stati ottenuti variando opportunamente il tempo di deposizione. La velocità di deposizione (rate) è stata stimata misurando lo spessore di film di riferimento mediante profilo metro.

2.3 Metodo di deposizione elettroforetica

Questo metodo di deposizione è stato descritto nel precedente rapporto [2]. Riassumiamo brevemente i passaggi principali.

- Materiale di partenza - nano polvere commerciali di Co_3O_4 (Aldrich, $< 50 \text{ nm}$).
- Macinazione manuale in un mortaio di agata
- Dispersione Co_3O_4 3.0 g/l in una soluzione di acetyl-acetone (acqua 10 ml/l e iodio metallico 2,5 g/l)
- Deposizione elettroforetica a 40 V per 240 sec in cella volume 40 ml (fig. 2) - Carico finale Co_3O_4 4.05 g/l
- Asciugatura in aria e trattamento termico a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ per 6 h.

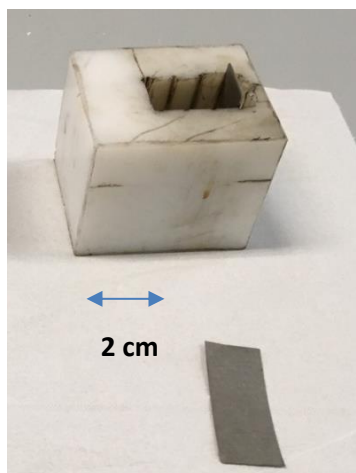


Figura 3. Cella elettroforetica per deposizione EPD per elettrodi da 1 cm^2 .

2.4 Metodo di elettro-deposizione

L'elettrodeposizione del Co su supporti metallici è un processo noto anche se poco comune trovando scarse applicazioni industriali. In generale, la metodologia di elettrodeposizione segue quella ampiamente utilizzata per l'elettrodeposizione del Nichel con cui il Cobalto ha elevata affinità. Come per il nichel esistono molte ricette che si differenziano per il tipo di bagno utilizzato, la temperatura, il pH, tutti parametri da cui dipendono le caratteristiche del deposito, (uniformità, porosità, durezza, lucentezza metallica, colore, etc.). Nel nostro caso, essendo l'applicazione l'elettrocatalisi, il parametro determinante è l'attività catalitica anodica per l'evoluzione di ossigeno (OER). In tal senso le caratteristiche fondamentali del processo di elettrodeposizione sono rivolte essenzialmente all'ottenimento di un deposito poroso per favorire lo scambio gas/elettrolita, con particelle possibilmente di dimensioni ridotte per aumentare l'area specifica, ben adese al supporto in acciaio ad evitare il distacco nel tempo e, cosa più importante, con una cinetica elevata per la OER. Un'attenta analisi della letteratura ha individuato una deposizione interessante dal punto di vista industriale, per la tipologia del bagno utilizzato e per la possibilità di effettuare co-deposizioni con altri metalli allo scopo eventuale di aumentare la cinetica.

Il metodo consiste in una deposizione galvano-statica a 20 mA cm^{-2} per 330 sec in un bagno costituito da una soluzione 145 g L^{-1} di Solfato di Cobalto ($\text{CoSO}_4 \times 5 \text{ H}_2\text{O}$) in una soluzione 0.1 M di $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e con un pH 5.6. La deposizione è stata effettuata sempre sugli dischetti di GDE già usati nella altre metodologie. Un secondo tentativo ha previsto una co-deposizione di Cobalto e Rame su un nuovo supporto in acciaio. In questo caso il bagno era costituito da una soluzione simile alla precedente ma con aggiunta di 3.08 g L^{-1} di Solfato di Rame ($\text{CuSO}_4 \times 5 \text{ H}_2\text{O}$) con l'obiettivo di ottenere una lega Co:Cu con rapporto in peso pari a 3:1.

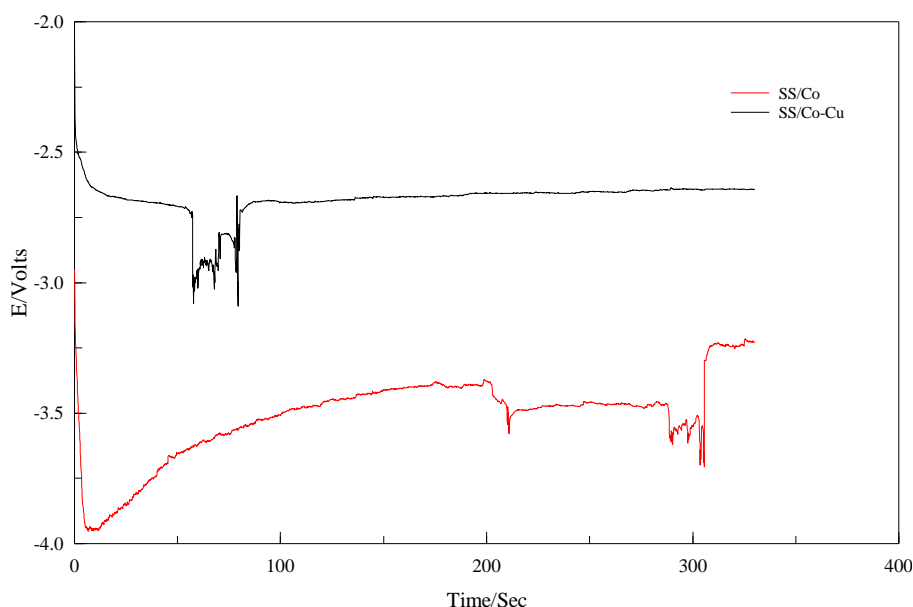


Figura 4. Curve di deposizione galvanica di Co e Co-Cu su acciaio.

2.5 Misure elettrochimiche e chimico fisiche

Per valutare le prestazioni elettrochimiche degli elettrodi compositi è stata utilizzata una cella di plexiglass a tre elettrodi: un elettrodo di riferimento a calomelano saturo (SCE), un contro elettrodo di platino (area 10 cm^2) e l'elettrodo di lavoro composito. La cella consente di alloggiare un campione di forma circolare ($\varnothing 16 \text{ mm}$) con una superficie esposta attiva di 0.785 cm^2 in una soluzione di KOH 0.5 M e posizionato in modo tale da essere parallelo al contro elettrodo di platino ad una distanza di 1.5 cm dallo stesso.

Misure potenziodinamiche sono state effettuate tramite un potenziostato 1287 (Solartron) con velocità di scansione variabili tra 1-100 mV/sec nell'intervallo di potenziale $0 \div 1,75 \text{ V vs. NHE}$. Polarizzazioni galvaniche sono state eseguite nella stessa configurazione di cella in condizione di stato quasi stazionario ($t=120 \text{ sec}$) a correnti tra 1-200 mA cm^{-2} . Misure di impedenza sono state effettuate nella stessa configurazione a tre elettrodi mediante un generatore di risposta in frequenza 1260 (Solartron) nell'intervallo 65 kHz-1 Hz al potenziale di circuito aperto (OCV) e con un segnale sinusoidale alternato di 10 mV.

Per valutare le prestazioni dei materiali (elettrodi o membrane) è stata usata una cella di elettrolisi da 2 cm^2 . La cella (Fig. 4) realizzata in acciaio (Allegato 1 – Progettazione) su entrambi i lati catodico e anodico può essere alimentata con acqua distillata o una soluzione KOH, contenuta in un serbatoio in polietilene da 500 ml utilizzando una pompa dosatrice (KMS), in Teflon con un flusso di 100 ml min^{-1} . L'uscita del lato catodico può essere collegata a un sistema volumetrico per la misurazione dell'idrogeno prodotto.



Figura 4. Cella di elettrolisi 2 cm^2 per la caratterizzazione dei materiali: membrane ed elettrodi.

I test elettrochimici sono stati effettuati con la cella collegata alla stessa strumentazione sopra descritta. Anche in questo caso sono state eseguite misure di spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS), nella gamma di frequenze 20 kHz-1 Hz, ad (OCP), l'ampiezza del segnale CA è sempre di 10 mV. Polarizzazione galvaniche sono state eseguite nella stessa configurazione di cella delle misurazioni EIS. Curve caratteristiche E vs. i sono state registrate sulla cella a temperatura ambiente (25°C) nell'intervallo di corrente 0-800 mA cm^{-2} . I grafici della tensione della cella rispetto al tempo sono stati registrati continuamente e gli spettri di impedenza sono stati periodicamente acquisiti all'OCP.

Tutte le micrografie sono state acquisite con un microscopio elettronico a scansione Auriga Zeiss Field Emission. Al fine di valutare la composizione degli ossidi metallici, sono state eseguite misurazioni di spettroscopia fotoelettronica (XPS) dei campioni con uno spettrometro ESCALAB MKII, dotato di una sorgente di raggi X a doppio anodo (Mg, Al), in alto vuoto di $1,0 \times 10^{-9}$ mbar (Oil free).

3 Risultati

3.1 Elettrodi prodotti per PVD e per elettrodeposizione

L'analisi in dettaglio delle fibre mediante microscopia ottica (Fig.5) del supporto di acciaio tal quale e dopo deposizione di Co e Co-Cu, evidenzia la formazione di depositi sulla superficie. Inizialmente le fibre si mostrano metalliche. Dopo deposizione, le fibre appaiono rivestite in modo diffuso di depositi di colore scuro. L'analisi in dettaglio del rivestimento delle fibre mediante SEM (Fig. 6) evidenzia la trasformazione subita dal materiale. La superficie originariamente liscia appare rivestita anche se in modo non omogeneo da agglomerati di depositi caratterizzati da particelle di dimensioni delle decine di nanometri in cui è visibile un certo grado di porosità.

Per quanto riguarda gli elettrodi prodotti per PVD in diverse condizioni di ossigenazione l'analisi in dettaglio del rivestimento delle fibre mediante SEM (Fig. 7) evidenzia la trasformazione subita dal materiale. La superficie originariamente liscia appare rivestita da uno strato denso ed omogeneo di materiale con un basso grado di porosità. L'aumento dell'ossigenazione del trattamento PVD evidenzia tuttavia una delaminazione in alcuni punti del deposito con parziali distacchi del rivestimento per questo motivo la procedura di ossigenazione viene scartata nel processo preparativo e nelle successive misure elettrochimiche.

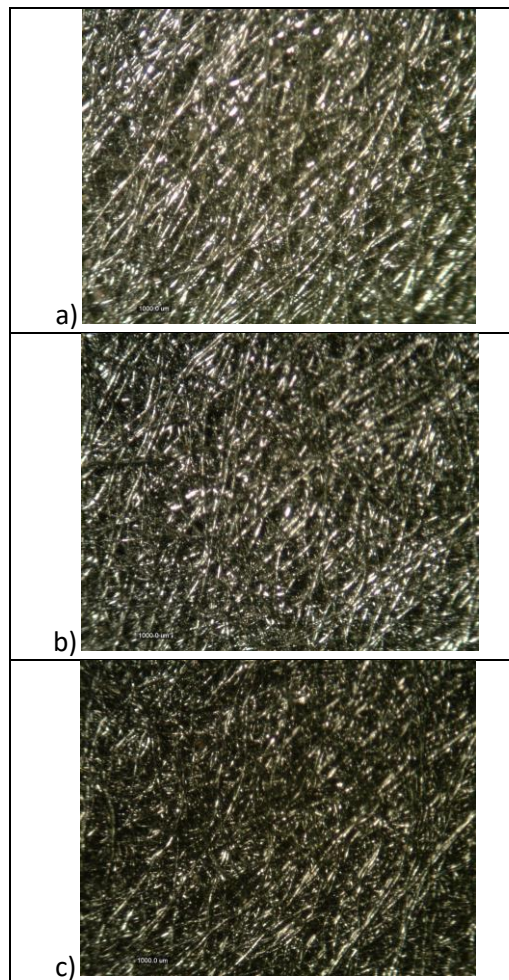
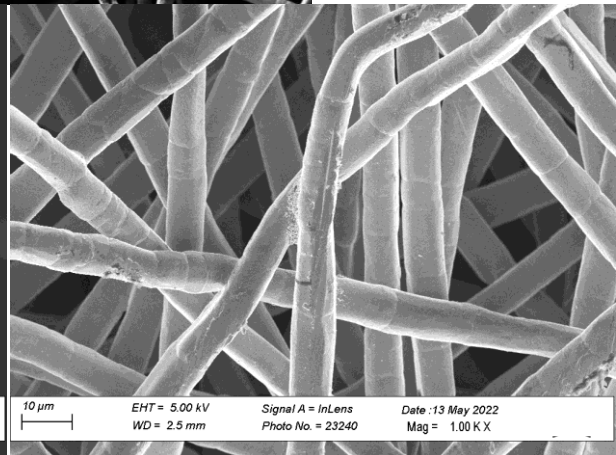
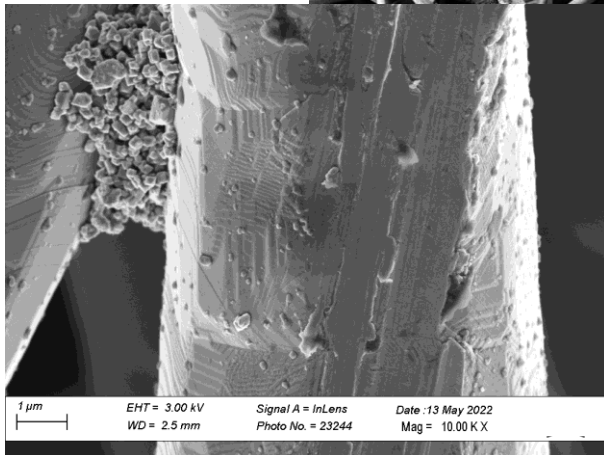
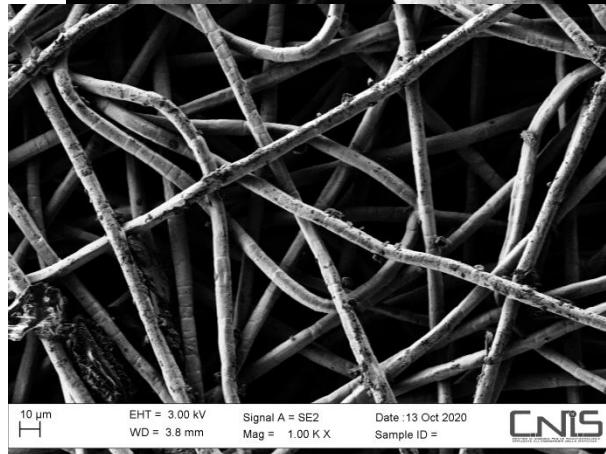
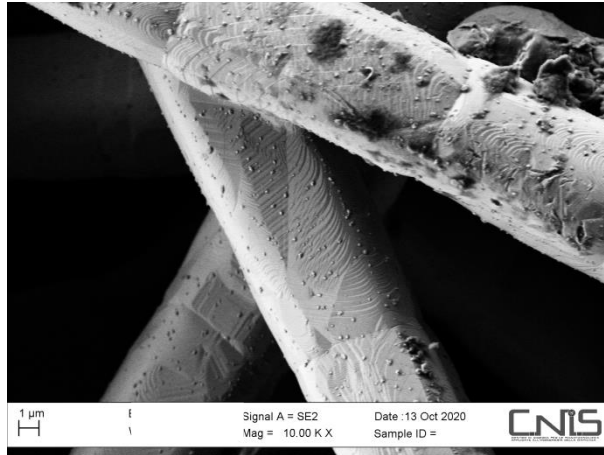


Figura 5. Fotografie dei substrati (area 2 cm²) tal quale (a), dopo elettro-deposizione Co (b) e dopo elettro-deposizione Co-Cu (c).



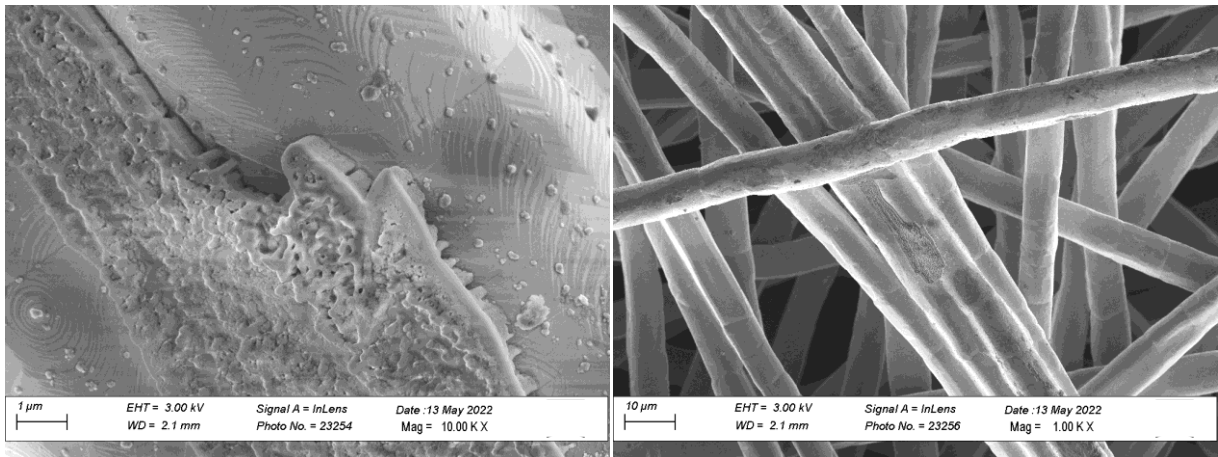


Figura 6. Foto SEM di GDE tal quale (in alto), dopo deposizione Co (al centro) e dopo deposizione Co-Cu.

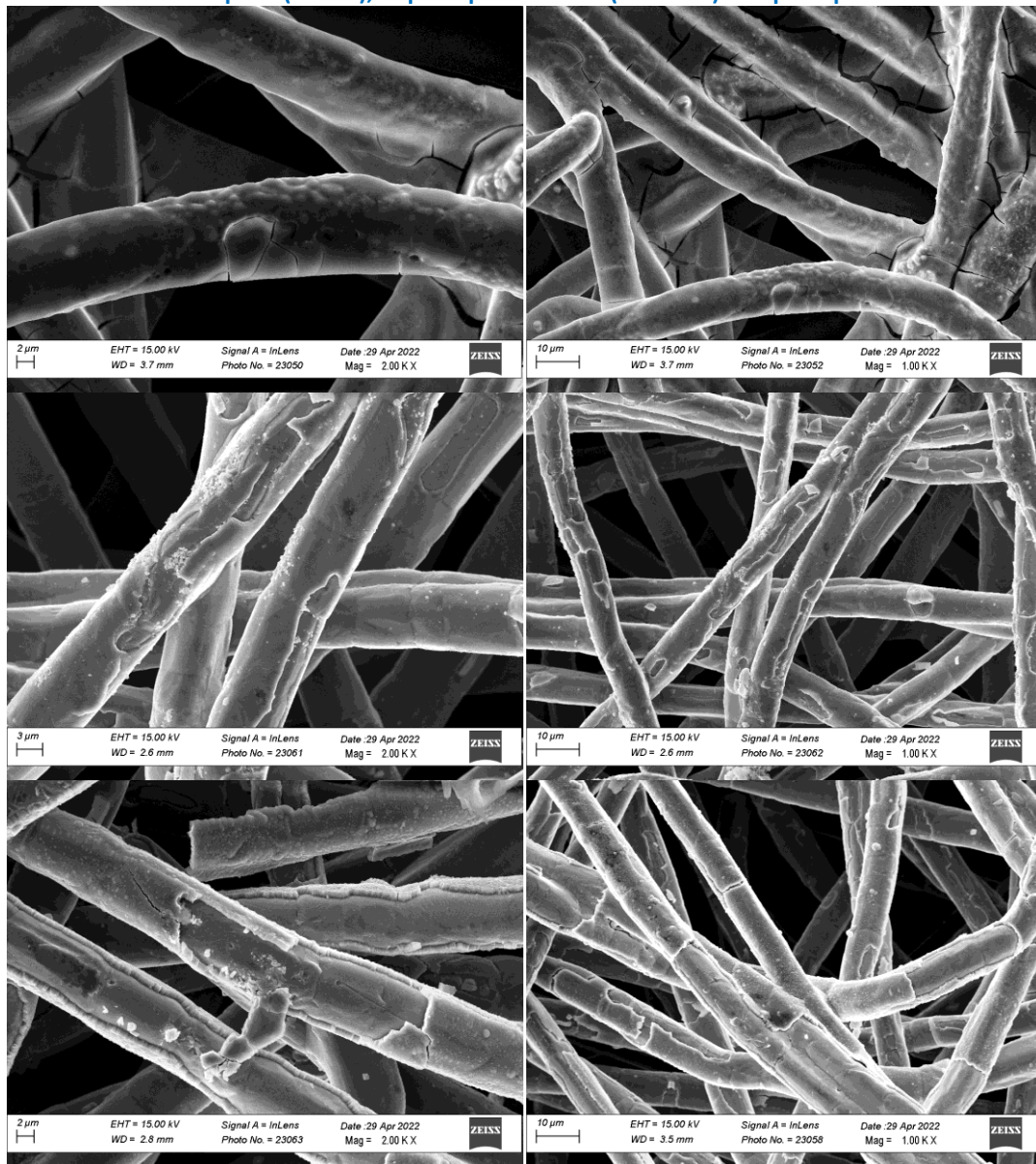


Figura 7. Foto SEM del GDE/PVD-Co prodotto in assenza (in alto), con poco (al centro) e con molto (in basso) O₂.

3.2 Caratterizzazione elettrochimica degli elettrodi.

La Fig. 8 mostra le voltammetrie eseguite sui campioni ottenuti per elettrodeposizione di Cu e Cu-Co e confrontati con il substrato in acciaio, il campione EPD e il campione ottenuto con PVD in assenza di ossigeno, evidenziando un comportamento diverso per i diversi elettrodi la cui densità di corrente massima segue l'andamento $SS/EPD-Co \geq SS/ED-Co > SS/ED-Co-Cu > SS/PVD-Co > SS$. La corrente massima si ottiene sia per il campione SS/EPD-Co che per SS/ED-Co, tuttavia riducendosi il potenziale elettrodico la corrente secondo diminuisce in modo vistoso. Il potenziale di onset per la scarica dell'ossigeno mostra l'andamento opposto riducendosi da circa 0.80 V vs NHE per SS e SS/ED-Co-Cu, a 0,77 V per SS/ED-Co, fino a circa 0.70 per SS/PVD-Co e 0.69 V per SS/EPD-Co (inserto Fig. 8). Ricordando che il potenziale termodinamico per la scarica dell'ossigeno in ambiente alcalino è di circa 0,401 V vs. NHE, il potenziale elettrodico in Fig. 8, a meno di tale costante, rappresenta proprio la sovratensione per la OER. Pertanto, i dati mostrano che il metodo EPD riesce ad aumentare l'attività catalitica in modo abbastanza efficace riducendo tale sovratensione di quasi 100 mV rispetto al substrato di acciaio.

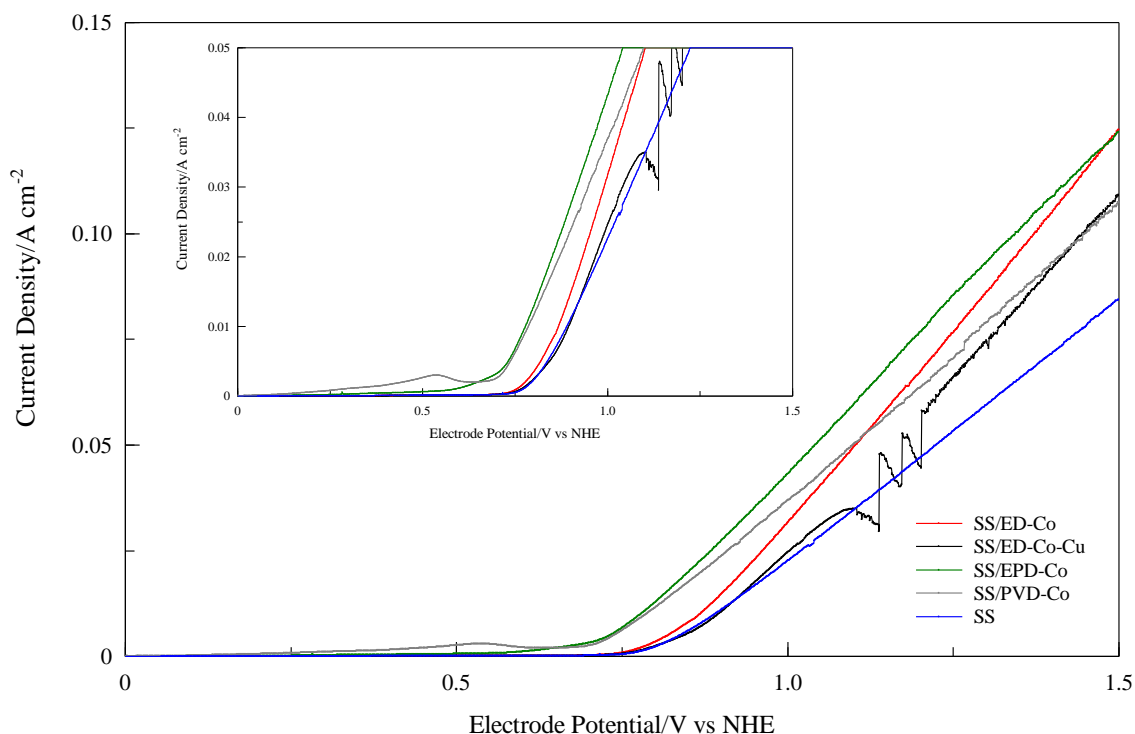


Figura 8. Curva voltammetrica (1 mV s^{-1}) per elettrodo in acciaio (SS) confrontato con elettrodo SS/EPD-Co e con elettrodi SS/ED-Co, SS/ED-Co-Cu e SS/PVD-Co in KOH 0,5 M a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3 Test lunga durata anodo SS/EPD-Co.

Le misure di lunga durata riportate in questa sezione sono state eseguite su cella da 2 cm^2 utilizzando come catodo la matrice commerciale in fibra di metallo sinterizzato in acciaio AISI 316 (Bekaert) di spessore 0.51 mm e con una porosità dell'82% già utilizzate per i test di elettrocatalisi e come anodo l'elettrodo rivestito con Co per EPD e già analizzato nelle misure in semi cella. La fig. 9 mostra il profilo tensione vs tempo per una cella con tale anodo e membrana Fumasep FAA-3PK-130 a 50 mA cm^{-2} per oltre 2000 h. Dopo circa 600 h di funzionamento la cella viene aperta sostituendo la membrana con una nuova e dopo circa 1300 e 2000 h di lavoro, si procede alla sostituzione della soluzione di ricircolo di KOH 0.5 M.

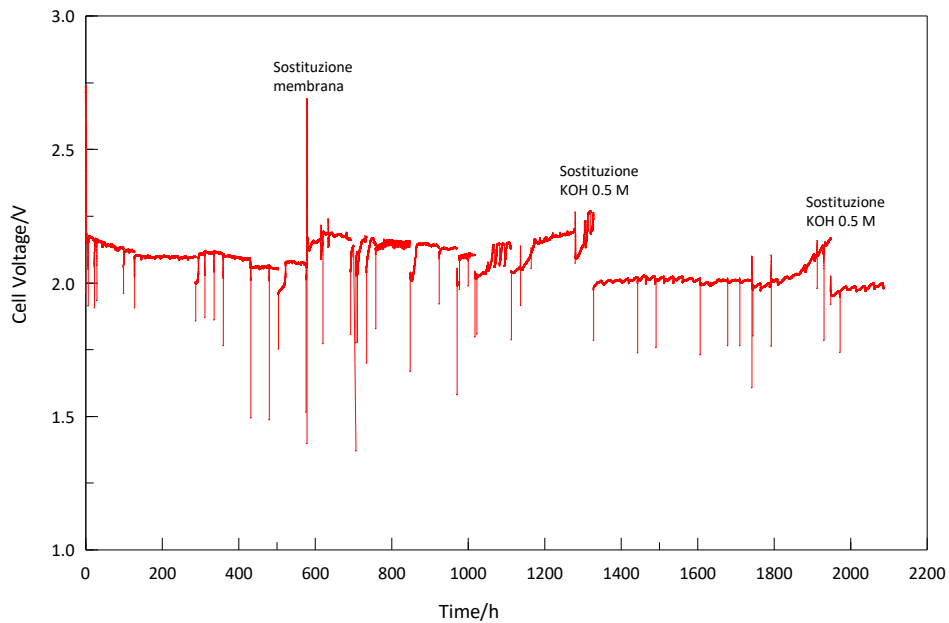


Figura 9. Tensione vs tempo per cella con anodo SS/EPD-Co e membrana Fumasep FAA-3PK-130 a 50 mA cm^{-2} . Cella da 2 cm^2 , temperatura 25° C alimentata con KOH $0,5 \text{ M}$ sul lato anodo a 100 ml min^{-1} .

Nel corso delle misure di lunga durata avvengono una serie di fenomeni legati alla variazione della conducibilità della membrana anionica a causa dell'instabilità della soluzione alcalina di alimentazione che subisce nel tempo un cambiamento del titolo a causa del probabile inquinamento da CO_2 . Questi fenomeni sono tuttavia reversibili e una sostituzione periodica della soluzione di alimentazione è in grado di ripristinare il sistema.

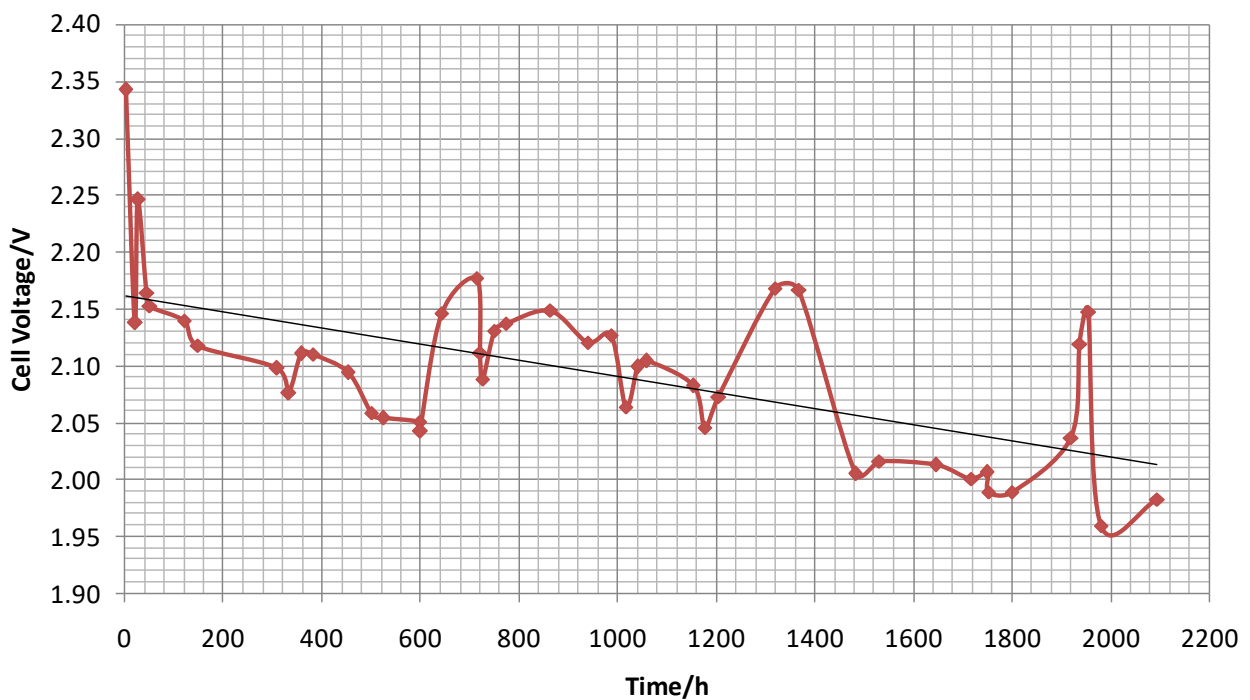


Figura 10. Tensione media vs tempo per cella con anodo SS/EPD-Co e membrana Fumasep FAA-3PK-130 a 50 mA cm^{-2} . Cella da 2 cm^2 , temperatura 25° C alimentata con KOH $0,5 \text{ M}$ sul lato anodo a 100 ml min^{-1} .

La tensione media della cella alla densità di corrente operativa è stata monitorata nel tempo evidenziando così all'interno della variabilità causata dai fenomeni suddetti, un lento ma graduale miglioramento delle prestazioni a partire da un valore iniziale di circa 2.35 V fino a raggiungere un valore finale di 1.98 V.

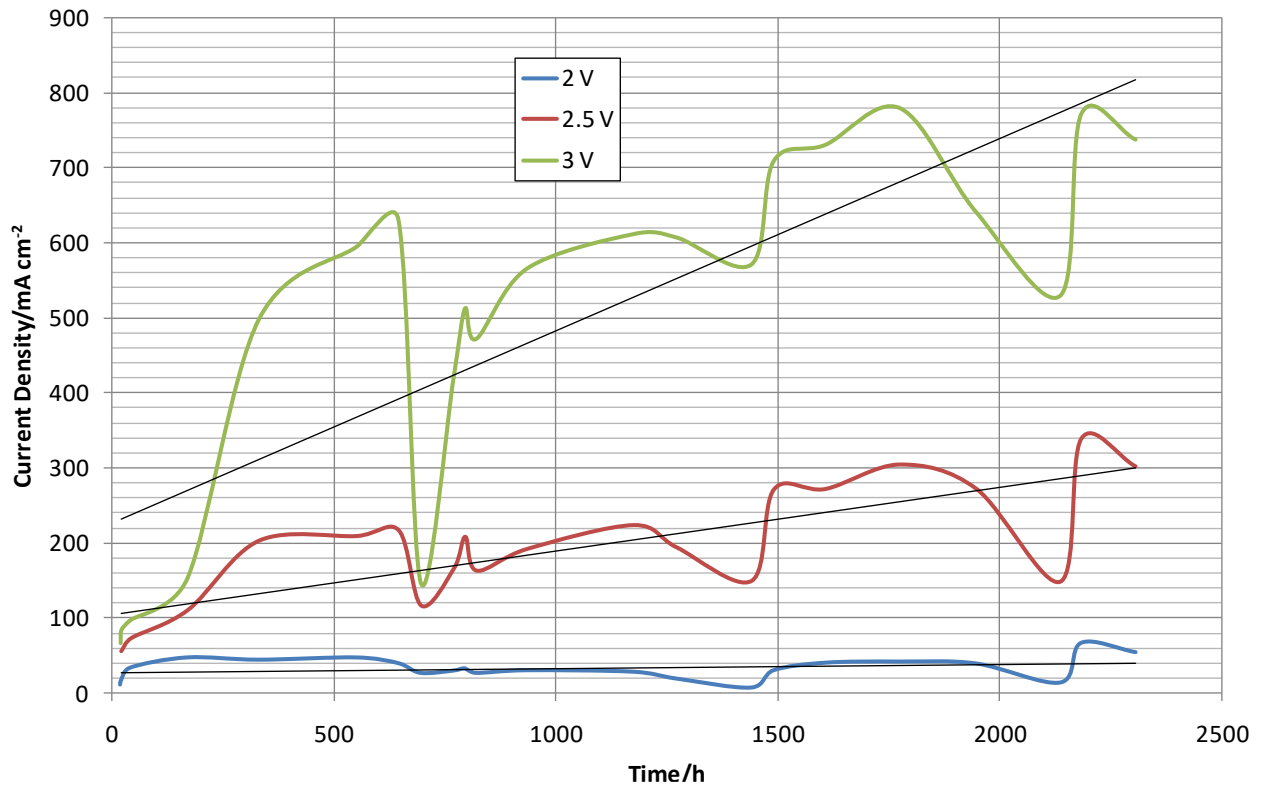


Figura 11. Densità corrente vs tempo per cella con anodo SS/EPD-Co e con membrana Fumasep FAA-3PK-130 a 2, 2,5 e 3 V. Cella da 2 cm², temperatura 25 ° Calimentata con KOH 0,5 M sul lato anodo a 100 ml min⁻¹.

Ad intervalli periodici di elettrolisi sono state misurate curve tensione/densità di corrente complete nell'intervallo 0-1000 mA cm⁻². Sempre considerando la variabilità del sistema dovuto alla membrana ed indipendente dalla natura dell'anodo, si evidenzia un evidente ma graduale incremento della densità di corrente maggiormente evidente a tensioni elevate (Fig. 11). Questo comportamento mostra chiaramente il limite delle membrane commerciali attualmente esistenti che soffrono di problemi legati all'effetto della contaminazione da CO₂.

Questa variabilità dovrebbe essere provocata in parte dalla carbonatazione della membrana. La conducibilità dovuta al trasporto degli ioni idrossido è influenzata dalla possibilità della rapida reazione di OH⁻ con CO₂ (ca. 400 ppm in aria ambiente), che sostituisce gli ioni OH⁻ con gli ioni bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato (CO₃²⁻) di dimensioni maggiori e minore mobilità (rispettivamente 7,5 e 4,8 x 10⁻⁸ m² s⁻¹ V⁻¹ contro i 20,4 dello ione OH⁻).



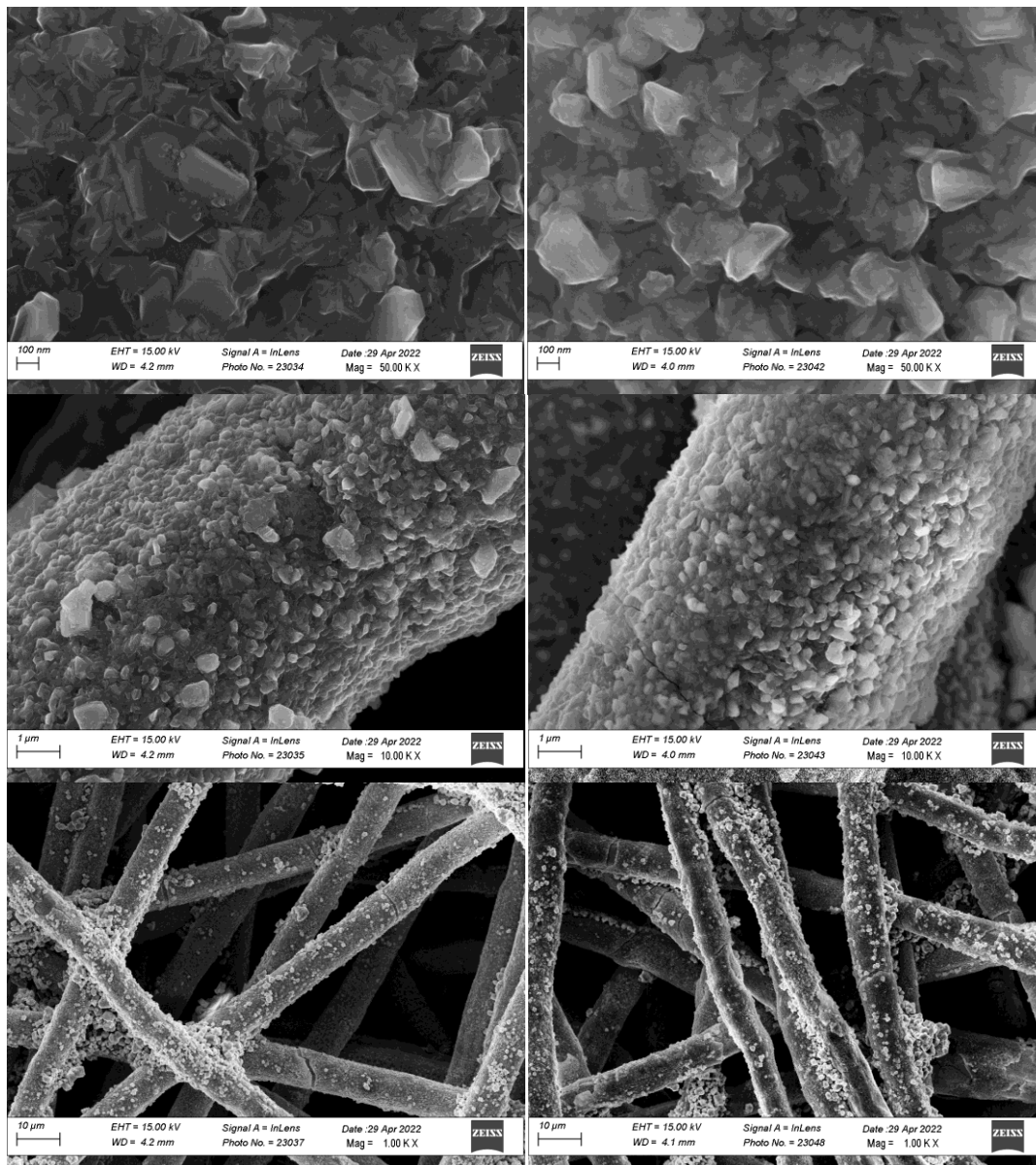


Figura 12. Foto SEM del SS/EDP-Co prima (colonna sx) e dopo test elettrolisi 2000 h (colonna dx).

Le foto SEM dell'anodo SS/EDP-Co prima e dopo i test di lunga durata evidenziano una omogeneizzazione della dimensione delle particelle adese sulle fibre verso dimensioni inferiori, questo dato potrebbe giustificare l'aumento delle prestazioni nel tempo come parzialmente legato ad un aumento dell'area geometrica attiva.

In parallelo le analisi XPS sullo stesso elettrodo evidenziano la presenza di Co (Fig 13) ed in particolare la posizione del picco Co 2p e la sua forma confermano una composizione prevalentemente costituita da Co_3O_4 prima di aver lavorato in cella di elettrolisi e la successiva presenza della forma idrossido $\text{Co}(\text{OH})_2$ dopo test di elettrolisi.

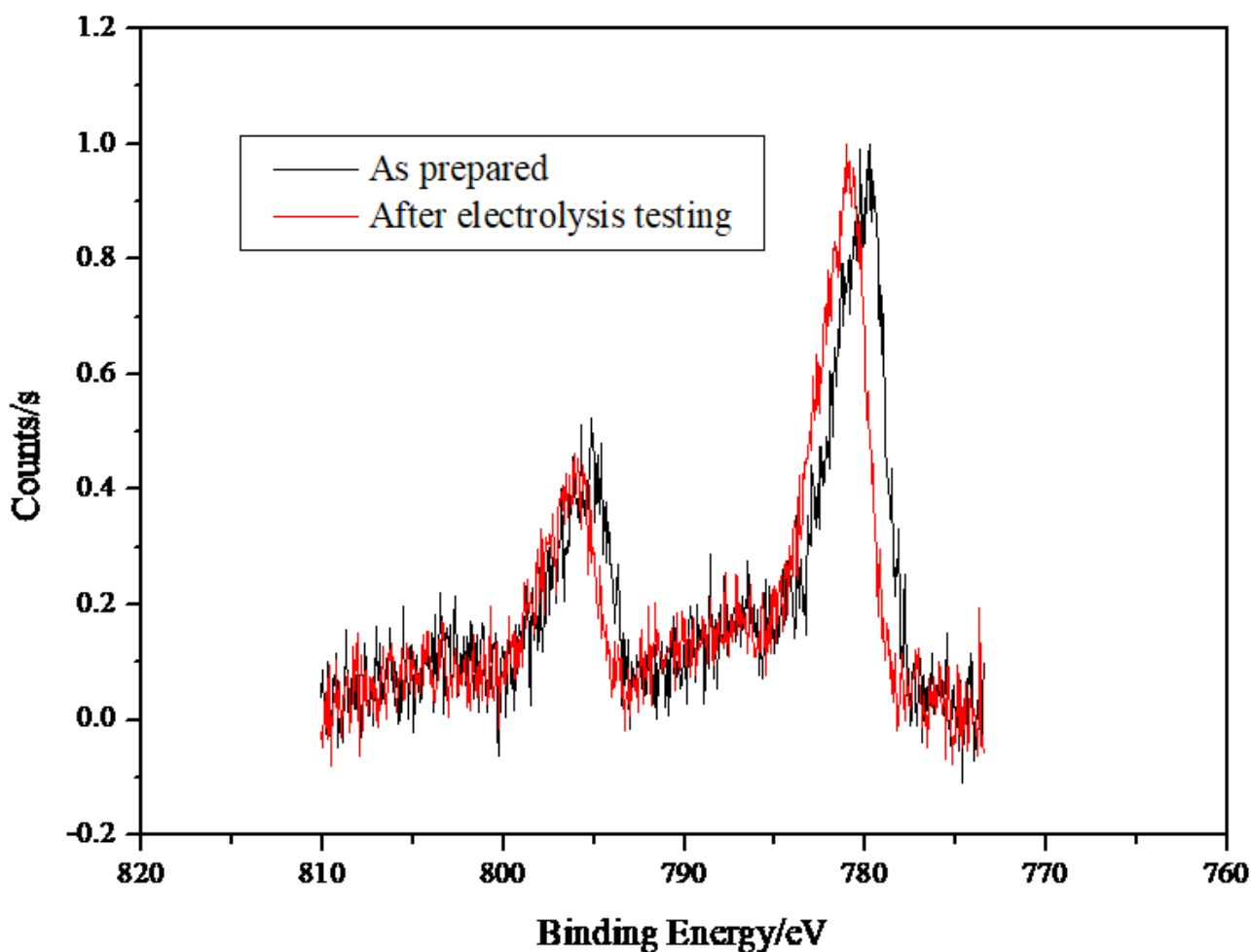


Figura 13. XPS spectra of SS/EPD-Co prima (colonna sx) e dopo test elettrolisi (colonna dx).

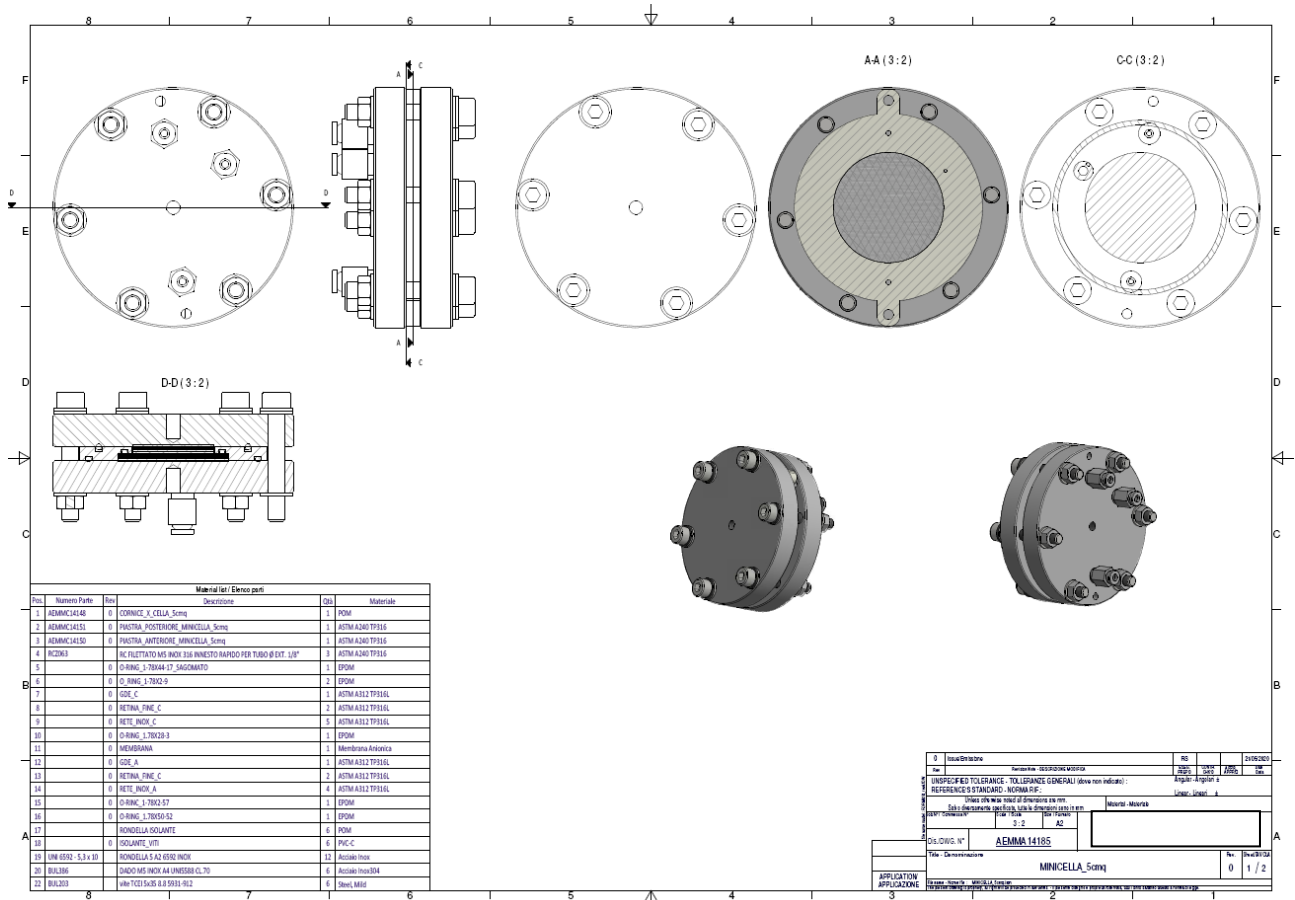
4 Conclusioni

In questo rapporto, è stata verificata la durata nel tempo di anodi per elettrolizzatori alcalini a membrana preparati attraverso la metodologia di deposizione del catalizzatore EPD messa a punto nei precedenti rapporti.

Il metodo che è basato sulla tecnologia della deposizione elettroforetica consente di ottenere in modo rapido e riproducibile rivestimenti di ossido di cobalto su supporti in acciaio migliorando le proprietà elettrocatalitiche dell'elettrodo. Misure di confronto con elettrodi preparati attraverso tecniche alternative quali elettrodeposizione e PVD hanno evidenziato questa caratteristica una buona capacita elettrocatalitica rispetto ad altre tecniche tradizionali.

L'analisi delle prestazioni nel tempo di anodi EPD del tipo SS/EPD-Co hanno mostrato una buona stabilità degli elettrodi. L'utilizzo di celle di elettrolisi con membrane anioniche commerciali come riferimento ha evidenziato la difficoltà di effettuare test di durata sui catalizzatori in cella, essendo le membrane stesse il principale fattore di degradazione delle prestazioni della cella di elettrolisi

Allegato 1 – Progettazione Cella Elettrolisi



Bibliografia

- 1 A. Pozio, F. Bozza, N. Lisi, RdS/PTR2020/2020
- 2 I. Zhitomirsky, Adv. Colloidal Interface Sci. 2002, 97, 279
- 3 F. Bozza, W.Schafbauer, W.A. Meulenberg, N. Bonanos, International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37, 8027
- 4 X. Wu, B. Wang, S. Li S, J. Liu, M. Yu, RSC Adv., 2015, 5/42, 33438-44
- 5 P. Yu, Q. Qian, X. Wang, H. Cheng, T. Ohsaka, L. Mao, J Mater Chem, 2010, 20/28, 5820-2