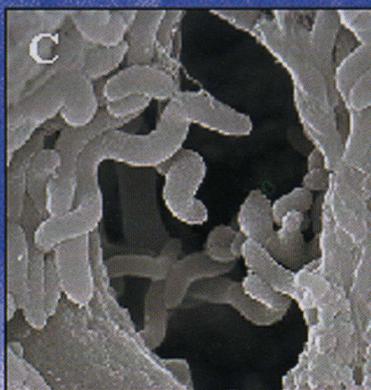
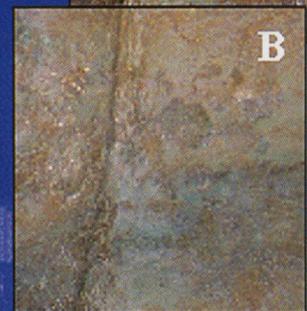
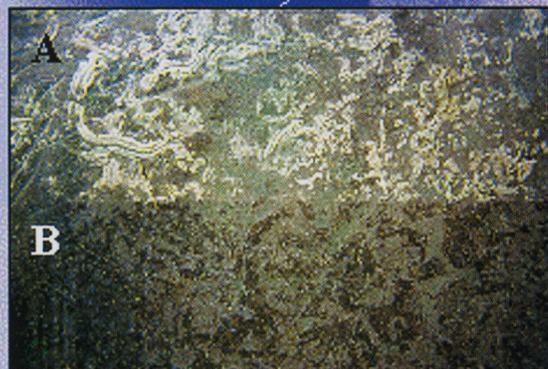


Il Cristo degli Abissi

50 anni di storia



TORME



97. Impronte di origine batterica originatesi dall'interazione tra gli organismi del *fouling* e il bronzo della statua durante le fasi iniziali dei processi corrosivi biologicamente influenzati.

- A) gli organismi del *macrofouling* prima delle operazioni di restauro,
- B) le impronte sul metallo visibili dopo l'asportazione degli organismi,
- C) fotografia al microscopio elettronico in cui sono visibili, fortemente ingranditi, i microrganismi (batteri) potenzialmente responsabili della deposizione di sostanze (impronte biologiche).

Le incrostazioni biologiche

Carla Morri¹, Marco Faimali², Carlo Nike Bianchi¹

¹ Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse (DipTeRis), Università di Genova

² Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Sezione Tecnologie Marine - Genova, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Il fenomeno del *biofouling*

Qualunque oggetto, di qualsiasi materiale e dimensione, immerso in mare viene, dopo un periodo di tempo più o meno a lungo, inesorabilmente attaccato e ricoperto da una serie eterogenea di organismi marini che scelgono, come sede definitiva del loro ciclo vitale, quella invitante superficie non ancora colonizzata. Queste associazioni di organismi vengono tipicamente indicate con il termine inglese *fouling*, che significa letteralmente "sporizia". La parola deriva dalla terminologia utilizzata nel campo delle tecnologie dedicate agli scambiatori termici, dove indica un deposito indesiderato di materiale sulle superfici che può essere di origine inorganica, organica o biologica. Il *fouling* di origine biologica, come nel caso della statua del *Cristo degli Abissi*, viene spesso definito, più precisamente, *biofouling*. Tale termine viene utilizzato in tutto il mondo per indicare il diffusissimo e complesso fenomeno dell'incrostazione biologica in ambiente marino. Non esiste una traduzione letterale italiana di questo termine: talvolta si usa la parola "vegetazione" (e si definiscono infatti "pitture anti-vegetative" le speciali vernici che si usano per impedire lo sviluppo del *biofouling* sulla chiglia delle navi e sui manufatti immersi). Il termine "vegetazione" ha però lo svantaggio di suggerire l'impressione che il *biofouling* sia composto essenzialmente da vegetali, il che non è affatto il caso. Di conseguenza, anche in italiano è invalso l'uso del termine inglese *biofouling*.

A prescindere dalle differenze legate all'ambiente acquatico ed al tipo di substrato, è possibile descrivere schematicamente gli eventi che si susseguono durante i processi di colonizzazione biologica dopo l'immersione in mare di un corpo solido. In un primissimo momento si ha un condizionamento della superficie: entro pochi minuti dall'immersione inizia infatti la deposizione di un sottile film macromolecolare costituito prevalentemente da polisaccaridi e proteine. Questo materiale organico si trova disciolto nell'acqua e deriva dalla decomposizione di organismi vegetali ed animali. Il processo di formazione di questa prima pellicola, che si completa nel giro di 1-2 giorni dall'immersione, rappresenta un evento "condizionante" in quanto nessun organismo, vivente o

morto, e nemmeno il particellato inorganico, riesce ad aderire o depositarsi facilmente, prima che tale rivestimento sia completato.

Successivamente si ha la formazione del cosiddetto biofilm, che abitualmente ha una durata di poche ore o giorni e consiste nell'attecchimento, sulla superficie precedentemente condizionata, di organismi microscopici unicellulari, costituenti il *microfouling*, tra cui prevalgono inizialmente i batteri. Generalmente nell'ambiente naturale i microrganismi tendono a non rimanere singole cellule isolate ma ad organizzarsi in vere e proprie comunità. Il *microfouling* che viene a formarsi in questa fase è caratterizzato dalla produzione, da parte dei microrganismi stessi, di secrezioni mucillaginose, talvolta molto abbondanti, che rendono la superficie scivolosa al tatto.

Successivamente si assiste alla crescita del biofilm, con ulteriore assorbimento di macromolecole organiche e insediamento di nuovi microrganismi, quali microalghe, funghi e protozoi di varie forme che colonizzano completamente la superficie.

A questo punto, solitamente dopo circa una settimana dall'immersione, le condizioni diventano favorevoli per l'insediamento di organismi macroscopici pluricellulari, tra cui tipicamente macroalghe e numerosi invertebrati marini, che continuano così il processo di colonizzazione delle superfici immerse. Questi organismi costituiscono il *macrofouling*, capace di formare col tempo incrostazioni di notevole spessore.

Oltre 4000 specie sono state descritte quali componenti del *macrofouling*, numero non sorprendente se si tiene conto che, in rapporto alle condizioni ecologiche del sito, pressoché tutti gli organismi bentonici sessili (quelli cioè che vivono saldamente attaccati al substrato) possono colonizzare le superfici immerse. La maggior parte degli organismi del benthos marino, infatti, presenta solitamente un ciclo vitale distinto in due fasi fondamentali: una fase "giovanile", durante la quale gli individui sono microscopici, vivono nel plancton e spendono energie e tempo alla ricerca di una superficie da colonizzare; ed una fase "adulta", nella quale, dopo una vera e propria trasformazione morfologica (metamorfosi), aderiscono saldamente alla superficie colonizzata.

L'importanza del *biofouling*

Lo studio del *biofouling* come evento biologico è estremamente affascinante, anche se in una visione strettamente antropocentrica esso è considerato per lo più come un danno, in quanto sottopone a seri problemi di bio-deteriorazione e malfunzionamento tutte le strutture immerse in mare o in cui circola acqua di mare: navi e scafi, tubazioni, condensatori, boe, piattaforme, strumenti oceanografici, cavi telefonici ed elettrici, attrezzi da pesca, impianti di acquicoltura, strutture in legno, metallo o calcestruzzo. Il *biofouling* è quindi in grado di creare problemi tecnologici ad ampio spettro con elevate ricadute economiche con costi stimati, in alcune pubblicazioni di settore, nell'ordine di miliardi di dollari all'anno. L'intensità di insediamento del *biofouling* sulla superficie dei corpi sommersi dipende da diversi fattori, tra loro interagenti, come la natura chimica del materiale, la tensione critica superficiale dello stesso, l'abbondanza e la varietà degli organismi presenti nell'ambiente, la profondità delle acque, la natura del moto ondoso e delle correnti ed altre caratteristiche ambientali del sito. La ricchezza di organismi fotosintetici (alghe) dipende in gran parte dalla disponibilità di luce, ovvero dalla profondità e dalla trasparenza delle acque: infatti, ove l'illuminazione è scarsa o assente, anche le alghe sono scarse e prevalgono gli organismi animali.

La presenza del *biofouling* sulle carene delle imbarcazioni, ad esempio, può determinare una riduzione della velocità di navigazione degli scafi con conseguente aumento dei costi di carburante. L'efficienza degli scambiatori di calore degli impianti che utilizzano l'acqua per il raffreddamento può essere seriamente compromessa dalla presenza del biofilm che isola la superficie metallica dalla fase acquosa limitando il trasporto convettivo del calore e aumentando i costi energetici per la corretta circolazione dell'acqua; lo sviluppo di *macrofouling* all'interno di tubazioni può addirittura occluderne completamente il lume.

Questi fenomeni sono aggravati dal fatto che molti organismi del *macrofouling* depositano scheletri e gusci calcarei. Studi recenti hanno messo in evidenza che la corrosione operata dalle comunità microbiche può essere anche aumentata dall'interazione con i resti calcarei degli organismi del *macrofouling*, sotto ai quali lo sviluppo dei batteri in condizioni anaerobiche genera particolari condizioni di limitazione degli scambi chimici tra l'acqua e il substrato, modificando profondamente i meccanismi e le velocità di svolgimento dei processi di biocorrosione e di biodegradazione delle superfici sottostanti.

Gli organismi incrostanti la statua del *Cristo degli Abissi*

Dopo 50 anni di immersione nella rada di San Fruttuoso, la statua del *Cristo degli Abissi* ha presentato una colonizzazione da parte del *biofouling* tutto sommato modesta. Oltre ad una patina algale diffusa, le maggiori incrostazioni biologiche si localizzavano

nelle porzioni più riparate e tra le asperità della superficie (ondulazioni della veste, chioma, ecc.).

Fra i principali componenti del *macrofouling* della statua, si possono ricordare alghe, spugne, idroidi, molluschi, serpuloidi, balani e briozoi.

Tra le alghe macroscopiche rinvenute, è opportuno distinguere due gruppi: le alghe a tallo calcareo incrostante e le alghe a tallo molle ed eretto. Le prime erano rappresentate da corallinacee che formavano localmente una concrezione basale di una certa rilevanza, le seconde da specie appartenenti sia alle alghe verdi sia alle alghe brune. Fra le alghe verdi, la specie più cospicua era *Acetabularia acetabulum*, dalla caratteristica forma ad "ombrello". Le specie di alghe brune erano numerose: tra le più significative si possono ricordare *Dictyota dichotoma*, *Stypocaulon scoparium* e *Padina pavonica*. Tutte le specie rinvenute sono tipiche dei popolamenti algali costieri di media profondità e di ambiente riparato dalle onde. Sono tipicamente esuberanti in periodo primaverile-estivo e tendono a scomparire nella brutta stagione.

Le spugne erano rappresentate solo da piccoli esemplari, in quantità trascurabile. Difficilmente le spugne sono importanti nelle associazioni *fouling* e non depositano strutture calcaree.

Più abbondanti e diffuse sono risultate alcune specie di idroidi. Gli idroidi appartengono agli cnidari ma le specie mediterranee, contrariamente a molti rappresentanti di questo vasto tipo animale, non depositano mai strutture calcaree. Le specie facenti parte del *fouling* sono pertanto tipicamente effimere, e caratterizzate da una forte stagionalità. Tuttavia, le loro colonie chitinose, di forma e dimensione diverse, aderiscono al substrato tramite stoloni reptanti, detti idrorize, che spesso formano una sorta di tappeto o di rete che può facilitare il successivo insediamento di altri organismi.

Tra i molluschi rinvenuti sulla statua del *Cristo degli Abissi*, è il caso di menzionare solo le specie sessili, incrostanti il substrato con le loro conchiglie calcaree. Tali specie appartenevano a due gruppi: i vermetidi ed i bivalvi. I vermetidi costituiscono una famiglia peculiare di gasteropodi sessili in cui la tipica conchiglia "a chiocciola" si perde ad uno stadio precoce di sviluppo e viene sostituita da un tubo calcareo incrostante, rugoso o sculturato, più o meno sinuoso e spesso avvolto a spirale, tanto da poter essere confuso con quello di un polichete serpulide. Sulla statua sono stati rinvenuti alcuni esemplari di *Vermetus triquetrus*, una specie comune su pietre e rocce in acque basse costiere. Tra i bivalvi, erano comuni due piccole specie: *Chama gryphoides* e *Hiatella arctica*. La prima salda una delle sue due valve al substrato, incrostandolo; la seconda vive libera, ma si installa nelle cavità della concrezione biologica, contribuendo così ad aumentarne la massa calcarea.

I serpuloidi costituiscono una superfamiglia di anellidi policheti. Si tratta di organismi sedentari che vivono in un tubo calcareo da essi stessi secreto. Nella maggior parte delle specie il tubo è fisso al substrato. I serpuloidi vengono tradizionalmente suddivisi nelle due famiglie dei serpulidi e degli spirorbidi. I serpulidi hanno

tubi generalmente di discrete dimensioni (anche diversi centimetri), allungati o sinuosi, mentre gli spirorbidi hanno un tubo di dimensioni molto minori (uno o due millimetri) avvolto su se stesso a spirale. Le specie rinvenute sulla statua del *Cristo degli Abissi* appartengono soprattutto ai serpulidi. *Pomatoceros triquetra* e *Spirobranchus polytrema* sono risultate le più abbondanti. Entrambe hanno un tubo di sezione triangolare che "impasta" il substrato, inglobandolo nella faccia inferiore del tubo. Fanno frequentemente parte di associazioni *fouling* sia costiere sia del largo. Altre specie presenti erano: *Serpula vermicularis*, *Serpula concharum*, *Hydroides pseudouncinatus*, *Vermiliopsis striaticeps*, *Josephella marenzelleri* e *Protula tubularia*. Tutte sono comuni nei fondi costieri mediterranei e possono occasionalmente comparire nel *fouling*, soprattutto in presenza di un'incrostazione già ben sviluppata. Mentre *Josephella marenzelleri* possiede un tubo molto fine, leggermente flessibile e debolmente calcificato, le altre specie hanno tubi ben calcarizzati e relativamente spessi. Tra gli spirorbidi, l'unica specie trovata è *Janua pagenstecheri*, comunissima in tutti gli ambienti costieri.

I balani sono crostacei aberranti, appartenenti ai cirripedi. Conducono vita sessile all'interno di un robusto guscio calcareo di forma conica, solitamente aderente al substrato tramite una piastra basale. Sono tra i più importanti costituenti del *fouling*, e possono formare concrezioni calcaree di notevole spessore. Le specie insediate sulla statua del *Cristo degli Abissi* erano due: *Balanus perforatus*, relativamente abbondante, e *Balanus trigonus*, molto più scarso. La prima è molto comune sulle scogliere nei primi metri di profondità, la seconda vive di solito a profondità un po' maggiori.

I briozoi, infine, costituiscono un tipo animale ricco di specie. Si tratta di animali coloniali che vivono fissi sul substrato, frequentemente presenti nelle associazioni *fouling*; numerose specie hanno scheletro calcareo. Tra queste ultime, quattro erano presenti sulla statua del *Cristo degli Abissi*. La più abbondante era *Schizoporella errata*, che forma colonie incrostanti, talvolta di notevole spessore, dal caratteristico colore bruno-rossastro o violetto. Simile è *Schizobrachiella sanguinea*, mentre *Annectocyma major*, più scarsa, ha colonie di dimensioni assai più piccole. *Scrupocellaria reptans*, poco abbondante, possiede colonie erette e ramificate.

Interazione tra *biofouling* e metalli immersi

L'interazione tra gli organismi del *microfouling* e quelli del *macrofouling* è in grado di innescare processi di corrosione localizzata delle superfici metalliche immerse in mare. Che i biofilm possano causare corrosione dei metalli è un fatto noto da tempo, ma solo recentemente è stato evidenziato il ruolo degli organismi del *macrofouling* come "incubatori" di associazioni microbiche ad elevato potere corrosivo.

Quando un organismo con guscio o scheletro calcareo (balani,

serpulidi, briozoi, ecc.) si insedia e cresce su una superficie metallica non la isola completamente dall'ambiente acquatico ma piuttosto crea una peculiare interfaccia tra acqua e metallo. All'interno di tale interfaccia possono svilupparsi colonie batteriche capaci di produrre grandi quantità di sostanze gelatinose. Queste sostanze gelatinose facilitano l'adesione del *biofilm* alla superficie metallica e modificano localmente la composizione chimica (pH e tenore di ossigeno). Al di sotto delle incrostazioni del *macrofouling*, si crea così un microambiente profondamente diverso da quello naturale. Il risultato è una forte riduzione della concentrazione di ossigeno sulla superficie metallica, con conseguente creazione di una zona anaerobica. Questa comincia a funzionare da anodo nei confronti della sovrastante zona aerobica ricca di ossigeno che si comporta invece da catodo. Il flusso di elettroni che si genera comporta una corrosione localizzata per accelerata dissoluzione del metallo. Il continuo consumo di ossigeno da parte dei microrganismi e il mancato apporto dall'esterno crea con il tempo un ambiente completamente anaerobico all'interno e sotto agli strati di *biofilm*. Queste condizioni sono quelle ideali per lo sviluppo massiccio di batteri solforiduttori (*Desulfovibrio*) che, se il fenomeno avviene su un metallo come l'acciaio, catalizzano la riduzione dei solfati a solfuri, dando luogo ad un prodotto di deposizione (solfuro di ferro) altamente insolubile che forma una tipica patina scura.

Le ultime ricerche sul *biofilm* in ambito industriale hanno però dimostrato che esistono anche batteri in grado di contrastare la corrosione. Studiando il comportamento di singole famiglie di batteri, prelevate da acque di raffreddamento di centrali termiche e fatte sviluppare sulle superfici di vari materiali posti in appositi brodi di coltura, è stato evidenziato infatti che alcune di queste famiglie creano dei *biofilm* che riducono drasticamente, anziché accelerare, la corrosione dei metalli. Questo significa che non sono ancora del tutto chiari i meccanismi che regolano o modulano la cinetica delle interazioni tra *microfouling* e *macrofouling* sui diversi materiali metallici. È necessario un ulteriore sforzo per comprendere quali, tra i numerosi fattori fisici, chimici e biologici, giocano un ruolo chiave nei processi di corrosione biologicamente influenzata.

Purtroppo, le attuali conoscenze sul ruolo del *biofouling* nella corrosione dei metalli immersi in mare riguardano quasi esclusivamente gli acciai inossidabili. Mancano invece informazioni sulle leghe metalliche utilizzate non in ambito industriale ma bensì artistico, come è appunto il caso del bronzo della statua del *Cristo degli Abissi*. Esperienze pregresse in Mar Ligure hanno fornito indicazioni che superfici di bronzo non sono idonee all'insediamento del *macrofouling*, probabilmente a causa dell'alto contenuto di rame (questo metallo, infatti, è tossico per la maggior parte degli organismi), ma non esistono informazioni precise sulla reale aggressività biologica del *biofouling* nei confronti di manufatti bronzei.

Le osservazioni effettuate durante il periodo di restauro della statua del *Cristo degli Abissi* hanno individuato tutte le componenti

biologiche potenzialmente necessarie per innescare fenomeni di corrosione localizzata. La rimozione degli organismi del *macrofouling* a scheletro calcareo ha infatti consentito di verificare la presenza, sulle superfici sottostanti, di patine di sostanze di deposizione probabilmente prodotte dal consorzio di microrganismi sviluppatosi nell'interfaccia tra guscio calcareo e metallo. Allo stato attuale delle conoscenze, non è chiaro se tali patine determinano solo un degrado estetico o possono rappresentare aree preferenziali di corrosione localizzata.

Considerazioni finali

La statua del *Cristo degli Abissi* è rimasta immersa in mare per cinquant'anni, tempo più che sufficiente allo sviluppo di comunità di *biofouling* diversificate ed abbondanti, capaci di incrostazioni cospicue. Ciononostante, le incrostazioni riscontrate sono risultate relativamente modeste, tanto che ampie porzioni della superficie della statua apparivano quasi prive di insediamento biologico, se si escludono *biofilm* e leggere patine algali praticamente ubiquiste ma effimere. Questo fatto può essere il risultato di due fattori principali. Il primo è la tossicità del rame, componente principale delle leghe di bronzo, che può avere inibito l'insediamento degli organismi. Il secondo è l'azione di pulizia periodica da parte di operatori subacquei volontari e di Corpi dello Stato che, rimuovendo meccanicamente gli organismi, hanno frenato l'accumulo del *macrofouling*. Il mancato sviluppo delle comunità incrostanti è testimoniato anche dalla scarsità di spugne: tali organismi, infatti, compaiono nel *fouling* solo nelle fasi mature e ben sviluppate, e risultano invece assenti nelle fasi pioniere di colonizzazione delle superfici immerse.

La composizione del *macrofouling* rinvenuto sulla statua del *Cristo degli Abissi* sembra rispecchiare quella delle comunità tipiche dell'ambiente in cui è stata inserita la statua: le specie identificate, cioè, sono per lo più caratteristiche dei fondi costieri litorali. Molte di queste specie possono anche comparire nei porti, soprattutto nelle parti meno confinate e non inquinate. Tuttavia non sono state trovate le specie tipiche del *fouling* portuale, come il serpulide *Hydroides elegans* o il cirripede *Balanus amphitrite*. Ciò suggerisce che le incrostazioni biologiche della statua del *Cristo degli Abissi* originino verosimilmente dai fondi rocciosi circostanti piuttosto che dalla chiglia dei natanti che frequentano la baia di San Fruttuoso o che si avvicinano alla statua per portare i turisti a osservarla dall'alto o i subacquei a visitarla in immersione.

Bianchi C. N., *Policheti Serpuloidei*. CNR, Roma, Guide per il riconoscimento delle specie animali delle acque lagunari e costiere, Serie AQ/1/96, 5: 187 pp., 1981

Bianchi C. N., Dore G., Morri C., *Guida del subacqueo naturalista: Mediterraneo e tropici* (2ª edizione). A.F.S., Nuoro: 281 pp., 1998.

Cabioc'h J., Floc'h J.-Y., Le Toquin A., Boudouresque C.-F., Meinesz A., Verlaque M. *Guide des algues des mers d'Europe*. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel: 231 pp., 1992

Morri C., Boero F., *Hydroids*. ODEMA, Bruxelles, Catalogue of main marine fouling organisms, 7: 88 pp., 1986.

Parenzan P., *Carta d'identità delle conchiglie del Mediterraneo. I. Gasteropod* Bios Taras, Taranto: 283 pp., 1970.

Parenzan P., *Carta d'identità delle conchiglie del Mediterraneo. II. Bivalvi (prima parte)*, Bios Taras, Taranto: 281 pp., 1974.

Parenzan P., *Carta d'identità delle conchiglie del Mediterraneo. II. Bivalvi (seconda parte)*, Bios Taras, Taranto: 546 pp., 1976.

Relini G., *La colonizzazione dei substrati duri in mare. Memorie di Biologia marina e di Oceanografia*, 4 (4-5-6): 201-261., 1974.

Relini G., *Fouling of different materials immersed at a depth of 200 m in the Ligurian Sea*, Proceedings of 4th international Congress on marine Corrosion and Fouling, Antibes-Juan Les Pins: 431-443., 1976.

Relini G., *Insediamiento di organismi marini di substrato duro in ambienti portuali mediterranei. Memorie di Biologia marina e di Oceanografia*, 10 (suppl.): 61-70., 1980

Relini G., *Cirripedi Toracici*, Guide per il riconoscimento delle specie animali delle acque lagunari e costiere, Serie AQ/1/91, 2: 116 pp., CNR, Roma, 1980.

Relini G., Faimali M., *Il biofouling. Biologia marina mediterranea*, 10 (suppl.): 285-326., 2003.

Zabala M., Maluquer P., *Illustrated keys for the classification of Mediterranean Bryozoa*, Treballs del Museu de Zoologia, Barcelona, 4: 294 pp., 1988.



98. Balani e serpulidi sono tra i principali costituenti delle incrostazioni biologiche della statua del *Cristo degli Abissi*. I primi sono rappresentati soprattutto da *Balanus perforatus*, i secondi da varie specie tra cui spicca, per taglia ma non per abbondanza, *Protula tubularia*, dal grande tubo liscio.



101. Il dorso della statua del *Cristo degli Abissi* mostra una colonizzazione biologica relativamente modesta e localizzata soprattutto tra le pieghe della veste, dove si osserva una sottile patina pressoché continua; si riconoscono inoltre diversi tubi di serpulidi, un balano dal caratteristico guscio conico ed una colonia di briozoo incrostante.



99. Le asperità delle superfici, come i bordi del medaglione posto sulla parte anteriore basale della statua del *Cristo degli Abissi*, sono quelle che mostravano il maggiore insediamento di *macrofouling*.



102. La mano destra del *Cristo degli Abissi*, accidentalmente staccata dal corpo della statua, è apparsa riccamente colonizzata da serpulidi.



100. Colonia del briozoo incrostante *Schizoporella errata* sull'interno della manica e aggregato di gusci del cirripede *Balanus perforatus* sul moncherino del braccio destro della statua del *Cristo degli Abissi*.



103. Il volto del *Cristo degli Abissi* con una colonia di briozoi calcarei incrostanti sulla guancia destra e balani e serpulidi sulla capigliatura.