



Enzimologia nel tessile

Biopreparazione del cotone ed uso degli enzimi nell'industria tessile (1ª parte)

di Yves M. Galante

Nel presente articolo, suddiviso in due parti, presentiamo un approccio enzimatico integrato nella filiera tessile, in cui dimostriamo che è possibile e conveniente applicare in un singolo processo differenti enzimi (ad esempio, amilasi, pectinasi, catalasi, cellulasi) in successione od in contemporaneo, in combinazione con ausiliari chimici facilmente biodegradabili.

Negli ultimi 10-15 anni, l'industria tessile è diventata uno dei campi principali di applicazione degli enzimi. Dalla sbazzima tradizionale allo *stone washing* enzimatico, al *biopolishing* di fibre cellulosiche, al trattamento con proteasi di seta e lana, all'ossidazione enzimatica di coloranti fino all'uso della catalasi per eliminazione di acqua ossigenata dopo candeggio e prima di tintura, il comparto tessile si è trasformato in un terreno fertile per le nuove applicazioni e per gli sviluppi dell'enzimologia moderna. Un gran numero di enzimi ricombinanti e/o bioingegnerizzati (ad esempio, cellulasi) sono stati recentemente introdotti in processi tessili, in tintorie e lavanderie industriali. Inoltre, nuovi enzimi *redox* sono stati sviluppati ed applicati all'ossidazione di coloranti su tessuti e capi oppure nelle acque di processo. Quest'approccio biochimico potrebbe sostituirsi in futuro all'ossidazione chimica più aggressiva ed inquinante.

Una tecnica innovativa nella preparazione del cotone grezzo è ora rappresentata dalla biopreparazione del cotone grezzo con una pectina lisi alcalina come alternativa biochimica alla tradizionale purga chimica eseguita con soda caustica a caldo. I vantaggi della biopreparazione possono essere significativi per il pro-

cesso, l'articolo finale e l'ambiente. Questo si traduce in un considerevole risparmio di acqua, energia, tempo ecc., oltre che in un miglioramento del processo in senso ecologico e della qualità dell'articolo tessile.

Dalla fine degli anni ottanta ad oggi, uno dei maggiori sviluppi dell'enzimologia moderna si è verificato nel campo tessile con l'introduzione di nuove cellulasi per la nobilitazione ed il finissaggio di tessuti e capi, di proteasi per il trattamento di lana e seta, di catalasi per l'eliminazione di acqua ossigenata dopo la fase di candeggio, di nuove amilasi per sbazzima e di laccasi per l'ossidazione di coloranti quali l'indaco. Una nuova ed interessantissima applicazione è anche rappresentata dalla purga enzimatica di cotone grezzo, detta biopreparazione, mediante una pectinasi alcalina ricombinata, in alternativa al tradizionale trattamento con soda caustica ad alta temperatura, che verrà descritta a fine articolo.

I principali enzimi utilizzati nell'industria tessile ed in tintoria industriale sono i seguenti:

- Amilasi: in sbazzima;
- Cellulasi: nello *stone washing* di jeans e capi in denim;
- Cellulasi: per il *biopolishing* o *biofinishing* di tessuti e capi in fibre cellulosiche;
- Proteasi: nel trattamento di fibre proteiche (seta e lana);
- Catalasi: per l'eliminazione di acqua

ossigenata dopo candeggio e prima di tintura;

- Laccasi: nell'ossidazione enzimatica di indaco;
- Perossidasi: nell'ossidazione enzimatica di coloranti reattivi non fissati;
- Lipasi: nello sgrassaggio e come ausiliario di sbazzima in presenza di grassi naturali;
- Pectinasi: per la biopreparazione di cotone grezzo.

Alcuni di questi enzimi sono ancora "naturali" cioè prodotti con tecniche tradizionali di fermentazione a partire da ceppi microbici selezionati ma sempre più numerosi sono gli esempi di enzimi ricombinanti o bioingegnerizzati, ottenuti con le più avanzate tecniche di ingegneria genetica e di bioingegneria di proteine.

Inoltre sono varie le recenti novità in enzimologia industriale tessile, fra le quali:

- endo-cellulasi: monocomponente usata nel trattamento di capi in denim (da *Trichoderma*, *Humicola*, *Streptomyces* ed altri organismi ancora);
- preparazioni di cellulasi privi di attività eso-cellulasi ed arricchite in attività endo-cellulasi, quindi con prestazioni migliorate in *biopolishing* e biofinissaggio di tessuti e capi;
- catalasi termostrabili e quindi più versatili;
- perossidasi per applicazioni in detergenza ed in tintoria industriale;
- proteasi con ampia tolleranza a condizioni *redox* e vasta potenzialità applicative, anche in condizioni estreme;
- emicellulasi, come ad esempio galattomannanasi, adatte per l'eliminazione di residui di gomme da stampa da pezzi di lana o seta in casi di necessità.

Considerando tuttavia l'enorme diffusione delle fibre cellulosiche lavorate

Yves M. Galante, Lamberti SpA - via Piave, 18 - Albizzate (VA) - yves.galante@lamberti.com.



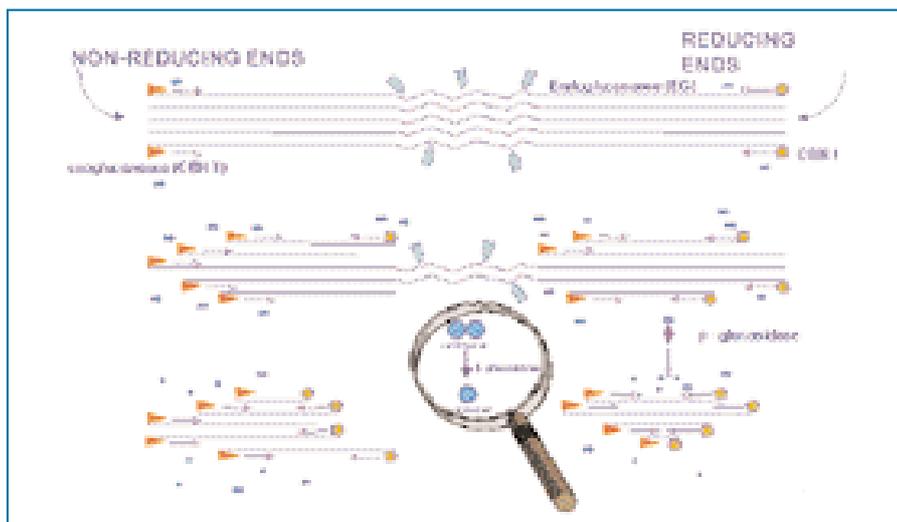


Figura 1 - Un modello di degradazione sinergica della cellulosa cristallina

dall'industria tessile a livello mondiale e la rilevanza applicativa di questi enzimi, è essenziale presentare in breve lo scenario attuale delle cellulasi e delle diverse opportunità che esse offrono.

Prima di esporre il nuovo processo di biopreparazione con pectinasi alcalina, verrà anche fatto accenno a catalasi e laccasi che rappresentano interessanti e recenti novità di enzimologia tessile.

Cellulasi

Le cellulasi sono enzimi prodotti da microorganismi (batteri e muffe), i quali hanno un ruolo fondamentale nella biodegradazione della cellulosa e nel ciclo globale del carbonio sul pianeta.

In natura, non si tratta di singoli enzimi (ovvero di singole proteine), bensì di complessi enzimatici con una molteplicità di componenti proteici attivi, dotati di forte sinergia nella degradazione della cellulosa. Tuttavia, mentre in natura lo scopo ultimo dell'azione delle cellulasi è di degradare la cellulosa a glucosio assimilabile dagli stessi microorganismi per il proprio metabolismo, a livello industriale si vuole invece modificare le fibre cellulosiche in maniera limitata e mirata in funzione del processo in cui vengono applicate. A livello industriale, di norma, si usano sia cellulasi prodotte con tecniche di fermentazione da ceppi selezionati di funghi filamentosi (muffe) o batteri non patogeni che cellulasi con pH ottimale d'azione acido oppure neutro.

Un "tipico" complesso cellulastico è composto da almeno sei-sette singole

attività enzimatiche: due eso-cellulasi (CBH), tre-quattro endo-cellulasi (EG) ed un beta-glucosidasi (BG).

Questa moltitudine di attività cellulolitiche permette di avere un'elevata sinergia nella degradazione della cellulosa.

Come raffigurato in Figura 1, le eso-cellulasi (CBH) idrolizzano la cellulosa all'estremità del polimero (a partire dalla sua estremità riducente o non riducente), mentre le endo-cellulasi (EG) agiscono all'interno, particolarmente là dove la forma fisica della cellulosa è amorfa ovvero "disorganizzata".

Ad ogni "taglio" operato da una EG, si creano due nuove estremità, che costituiscono altrettanti siti di idrolisi per le eso-cellulasi.

Con tecniche di biologia molecolare e di biochimica, si possono produrre singole attività cellulasiche (ad esempio, una singola EG senza altri componenti) oppure complessi arricchiti in sottofamiglie di attività endo- oppure eso-cellulasiche.

Eliminando o modulando la sinergia fra eso- ed endo-cellulasi, si possono ottenere effetti di degradazione enzimatica limitata e mirata della cellulosa, evitando una depolimerizzazione eccessiva o non voluta, con conseguente perdita di resistenza della fibra.

Per bioingegneria di proteine, è inoltre possibile mutare in maniera mirata le caratteristiche di affinità, catalisi, stabilità ecc., anche di singole subunità del complesso cellulastico, per meglio adattare a particolari applicazioni.

I due principali microorganismi produttori di cellulasi sfruttati industrialmente

fino ad un paio di anni fa circa sono stati: *Trichoderma reesei* (per cellulasi acide) e *Humicola insolens* (per cellulasi neutre).

La maggior parte degli enzimi cellulolitici (CBH & EG) hanno una struttura comune con i due domini distinti: un dominio catalitico (CD) ed un dominio di *binding* alla cellulosa (CBD).

Il CD porta il sito attivo (ad imbuto per CBH, a ferro di cavallo per EG) ed idrolizza il legame glicosidico. Il CBD lega l'enzima al substrato cellulosico, ma non idrolizza la cellulosa.

Queste due regioni o domini sono collegati da un polipeptide di legame (*linker*) che conferisce notevole flessibilità di configurazione e movimento all'intera molecola dell'enzima.

Il dominio catalitico ha una stereostruttura in grado di aderire alla cellulosa, posizionare in maniera adeguata il legame glicosidico da idrolizzare e finalmente di "tagliarlo".

La differenza principale fra il sito catalitico di una CBH (esocellulasi) ed una EG (endocellulasi) è che il primo è a forma di *tunnel* o imbuto, riuscendo quindi ad inserirsi solo all'estremità del polimero; il secondo invece è a forma di ferro di cavallo, cioè a U, e si può quindi legare all'interno del polimero.

I modelli molecolari del sito catalitico di una CBH1 da *T. reesei* ed una EG da *H. insolens* sono raffigurati in Figura 2. Vi è stato un enorme progresso nella ricerca e sviluppo di cellulasi "industriali" particolarmente per applicazioni in campo tessile.

Negli ultimi due anni, sono state introdotte sul mercato nuove cellulasi neutre prodotte da specie di altri microorganismi, quali: *Chrisosporium*, *Thermomonospora fusca*, *Melanocarpus albomyces*.

Queste nuove cellulasi commerciali sono oramai, più che un complesso enzimatico naturale, il frutto di sofisticati interventi di biologia molecolare, per cui sono prodotti enzimatici a singolo componente oppure a "composizione interna ottimizzata" per l'applicazione tessile.

Molte delle nuove cellulasi proposte al mercato sono quindi state modificate rispetto ai complessi naturali che costituivano i prodotti commerciali di prima generazione introdotti dieci anni fa circa.

Queste modifiche possono essere di varia natura, quali:

- produzione di singole attività endo-





cellulasiche espresse da un gene clonato;

- rapporti alterati delle singole attività all'interno del complesso cellulastico;
- eliminazione dal complesso di tutte le attività esocellulasiche, con livelli di endocellulasi elevati per particolari applicazioni (vedi ad esempio, il trattamento del Tencel o del lino);
- produzione di singoli componenti del complesso cellulastico in cui è stata troncata una porzione della molecola, ad esempio il CBD, per dare minor affinità per la cellulosa.

Alcuni dei risultati commerciali conseguiti e di maggiore rilevanza pratica sono:

- produzione di cellulasi neutre da *Humicola insolens*;
- produzione ad altissima resa di cellulasi acide da *Trichoderma reesei*;
- produzione di singole attività cellulasiche da *Humicola* (EG V), da *Trichoderma* (EG III), formulate in prodotti commerciali;
- produzione di complessi di cellulasi acide da *Trichoderma*, da *Aspergillus* o da *Penicillium*, modificati in modo da essere arricchiti in attività endo-cellulasiche (EG I o II) ed impoveriti o privi di attività eso-cellulasiche (CBH I e/o II) per applicazioni speciali nel tessile, in cartiera, in disinchiostrazione, in zootecnia;
- produzione di cellulasi neutre ed alcuni loro componenti da altri microrganismi come *Melanocarpus* e *Chrysosporium*.

Nel giro di pochi anni quindi, il settore delle cellulasi industriali si è enormemente arricchito di nuove conoscenze, nuovi prodotti, nuove applicazioni e nuovi possibili mercati.

Questo comporta numerose opportunità tecniche, industriali e commerciali ma implica indubbiamente un livello di complicazione enormemente maggiore.

Uso di cellulasi nell'industria tessile

Come menzionato prima, viene stimato che il 70% circa delle fibre lavorate dall'industria tessile sia di natura cellulosa. Questo comparto industriale rappresenta quindi un'ottima opportunità per trattamenti con enzimi cellulastici.

Le più comuni fibre cellulosiche sono: cotone, lino, viscose e *lyocell* da pasta di legno ecc.

Le finalità d'uso delle cellulasi nell'in-

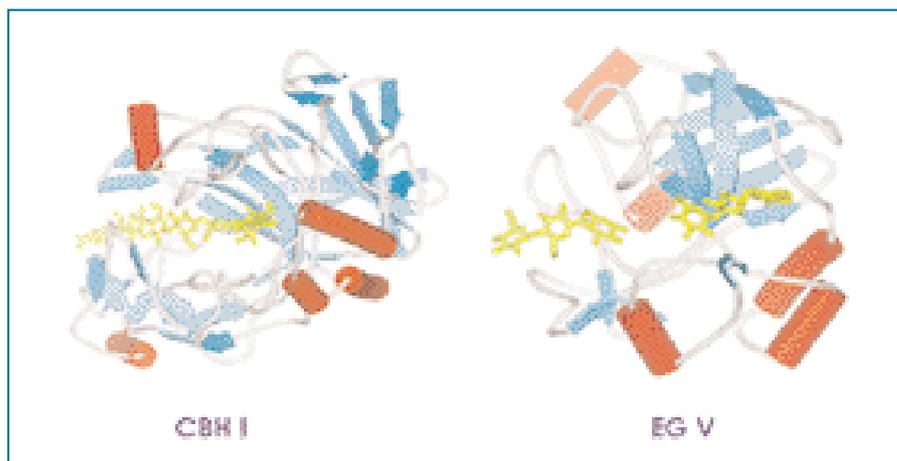


Figura 2 - Domini catalitici di CBH I da *T. reesei* e EG V da *H. insolens*

dustria tessile possono essere assai svariate e sono in continua evoluzione.

Fra le più importanti si possono menzionare:

- lo *stone wash* enzimatico dei capi in denim;
- il *biopolishing* ovvero la "defibrillazione" superficiale dei tessuti o dei capi confezionati, prima o dopo tintura;
- la rimozione delle imperfezioni della fibra e del cotone immaturo o "morto";
- la modifica di mano e l'ammorbidente permanente del tessuto;
- il miglioramento della qualità di stampa;
- un possibile incremento dell'affinità tintoriale.

Si tratta di applicazioni che possono interessare in varia misura l'operatore industriale (tintore o lavaiaio) oppure il consumatore finale del prodotto tessile, ma che comunque contribuiscono al miglioramento della qualità dell'articolo ed al valore aggiunto di molti manufatti tessili.

È oramai comunemente noto che gli impieghi di cellulasi nel tessile consentono una nuova gamma di processi industriali di nobilitazione, finissaggio ed "effetti moda" di tessuti e capi confezionati, con un approccio assolutamente ecologico, perchè interamente basato su agenti biologici completamente biodegradabili.

Come già menzionato, i vari enzimi cellulastici si possono distinguere in due principali tipologie: cellulasi neutre e cellulasi acide.

Questa distinzione si riferisce al loro pH ottimale di attività ed è una caratteristica biochimica intrinseca conferita all'enzima dal ceppo fungi-

no che naturalmente lo produce.

Anche la composizione in subunità esocellulasiche (CBH) ed endocellulasiche (EG) è in una certa misura diversa fra cellulasi acide e neutre, determinandone anche le caratteristiche applicative e quindi la relativa rilevanza commerciale.

Le cellulasi neutre (pH ottimale 6,5-7,5) sono impiegate principalmente nello *stone wash* enzimatico dei capi in denim (*jeans*, giubbotti, camicie ecc.) per ammorbidire in maniera permanente un tessuto particolarmente "duro", oltre a conferire quell'aspetto "delavato" od invecchiato all'indumento, grazie ad un parziale distacco dell'indaco dovuto all'azione della cellulasi combinata con l'abrasione meccanica fra capo e capo e fra capo e macchina.

Questo *look*, detto quindi di *stone wash*, è particolarmente apprezzato dal mercato, anche se la moda può variare nel grado di abrasione più o meno spinto che predilige (Figura 3).

Il trattamento viene effettuato in macchina da lavare industriale ed ha sostituito quasi interamente l'uso della sola pietra pomice, da considerarsi dannoso per le macchine, per i capi di abbigliamento, per il personale addetto e per l'ambiente in generale.

Le cellulasi neutre sono enzimi meno aggressivi delle cellulasi acide, ma particolarmente apprezzati in quanto causano minor rideposito dell'indaco sul capo (tessuto e fodere), un fenomeno conosciuto come *backstaining* (Figura 4).

Pur esistendo in natura numerose specie di microrganismi che producono cellulasi neutre e perfino alcaline, il principale fungo filamentoso a tutt'oggi



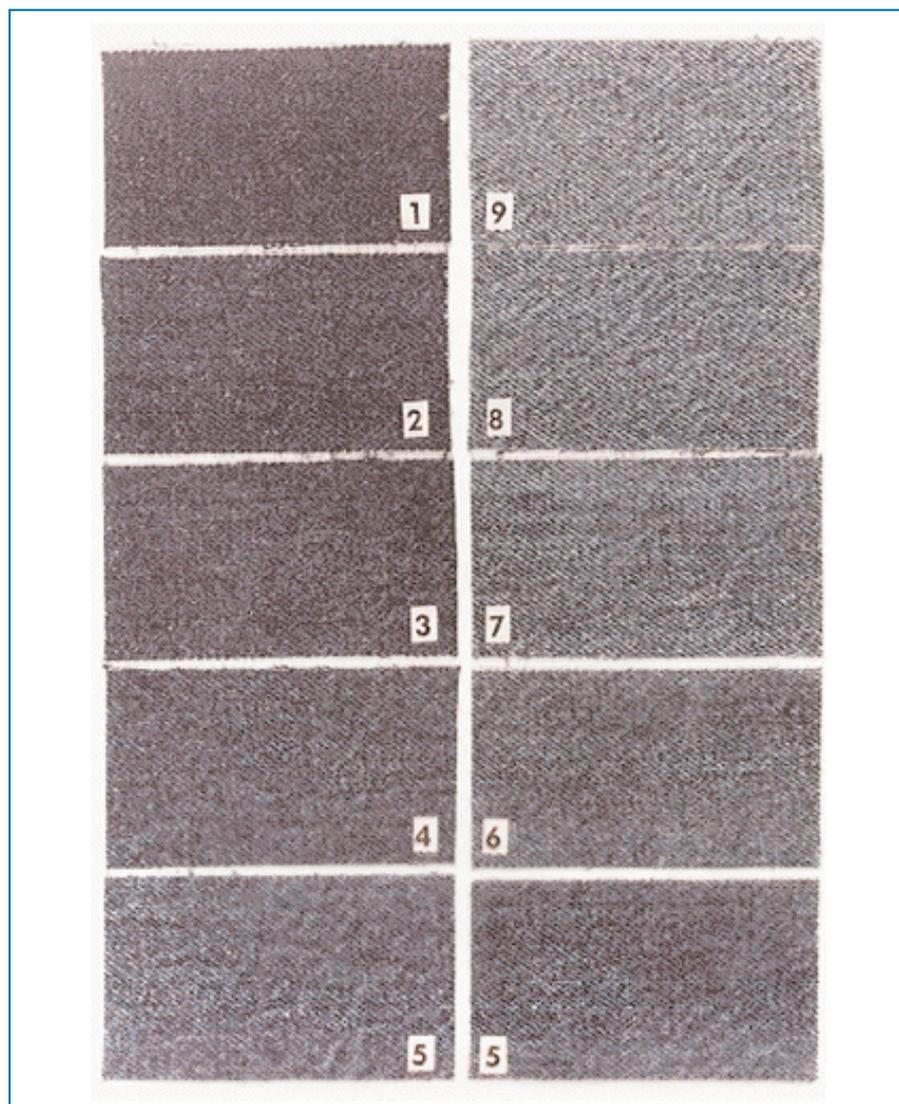


Figura 3 - Scala di abrasione del denim

sfruttato industrialmente per la produzione di cellulasi neutra è *Humicola insolens*, che produce un particolare complesso cellulastico con ottimo di pH attorno a 7. Da *Humicola* sono stati anche isolati singoli geni del complesso, inseriti in opportuni ospiti d'espressione (ad esempio, *Aspergillus oryzae*), per produrre singole attività endocellulasiche neutre, come la EGV proposta al mercato in forma liquida o granulare.

Operazioni analoghe sono state compiute più recentemente su altre specie fungine sfruttate per produrre cellulasi neutre: *Chrysosporium*, *Melanocarpus*, *Thermonospora*, per cui la gamma di cellulasi neutre commerciali si è ampliata.

Le cellulasi acide (con pH ottimale attorno a pH 4,5-5,5) sono impiegate nei processi di preparazione, nobilita-

zione e rifinitura dei tessuti a maglia o navetta, prima o dopo tintura, con varie finalità, tutte comunque indirizzate al miglioramento della qualità del tessuto.

Sono enzimi anche largamente usati nel trattamento di *biopolishing* di capi confezionati (ad esempio, magliette, felpe, camicie, pantaloni ecc.), prima o dopo tintura.

Le modalità d'uso di questi enzimi variano a seconda del tipo di macchinario impiegato (*flow*, *jet*, *jigger* ecc.), della natura del tessuto da trattare, delle condizioni di pH e temperatura del bagno, dell'azione meccanica esercitata nel processo ecc.

Le cellulasi acide sono generalmente caratterizzate da un'azione più aggressiva sul cotone, il che causa un energico effetto di *biopolishing* od abrasione.

Nel caso del capo in *denim* tuttavia, l'azione delle cellulasi acide "tradizionali" è associata ad un maggior rideposito di indaco sulla fibra (Figura 4), il che contribuisce sia a colorare di azzurro più o meno intenso il rovescio dei capi, le tasche e fodere, sia a "mascherare" in parte l'abrasione sul tessuto, dando un effetto meno sgranato e più "appiattito" del *delavé*.

Uno dei più interessanti sviluppi recenti è stato l'introduzione commerciale di una cellulasi acida a singolo componente, rappresentato dalla EG III di *T. reesei*.

Questa particolare endocellulasi, pur provenendo da un complesso di cellulasi acida, è naturalmente priva del CBD, ha un'attività ottimale a pH attorno a 6 e funziona a temperature più moderate attorno a 40-45 °C.

In applicazione di *stone wash* di capi in *denim*, queste caratteristiche permettono di ottenere risultati pratici molto simili a quello delle tradizionali cellulasi neutre, con un possibile risparmio in termini di costi di enzima e di energia.

Come nel caso della EGV da *Humicola*, anche la EG III da *Trichoderma* è già da alcuni anni offerta al mercato in forma liquida e granulare.

Il vecchio paradigma per cui cellulasi acida uguale a *backstaining* e cellulasi neutra uguale a pulizia del capo è quindi superato da questo contributo della biotecnologia.

Lo *stone wash* enzimatico dei capi in *denim*

Quest'applicazione innovativa ed originale delle cellulasi si è sviluppata verso la fine degli anni ottanta e si è rapidamente affermata presso le tinto-lavanderie industriali.

Come è noto, questo trattamento consiste nell'uso di particolari miscele di cellulasi, opportunamente formulate con altri composti chimici di base e con ausiliari (sali tamponanti, tensioattivi, agenti disperdenti ecc.), per ottenere l'effetto *stone wash* od invecchiato di capi confezionati in tessuto *denim* (*jeans*, giubbotti, camicie ecc.). L'effetto che si vuole ottenere è un'abrasione più o meno spinta del capo, con contrasto tra filo bianco (in trama) e filo tinto indaco (in ordito) come esemplificato da una scala arbitraria di abrasione in Figura 3, associato ad un basso *backstaining* (ovvero





basso rideposito di indaco sulla fibra, come dimostrato da una scala arbitraria in Figura 4) ed una minima perdita di resistenza del tessuto e/o del capo sulle cuciture nei punti "critici" (ad esempio, le tasche posteriori).

Questo rideposito di indaco o *back-staining* maschera infatti parzialmente l'effetto *stone wash*, "sporcando" il rovescio del capo, le tasche, le fodere interne ed eventuali *plique* ed è nel complesso una caratteristica considerata negativa dal mercato, con perdita di valore merceologico del capo trattato. L'applicazione di cellulasi nello *stone wash* ha sostituito in parte o completamente l'uso di pietra pomice.

Una quota di pietra viene ancora usata in lavaggi industriali per esaltare l'abrasione delle cellulasi o per permettere una movimentazione più uniforme della massa di capi bagnati. Alcuni operatori usano enzimi senza pietre in macchina, ma oramai non più il contrario.

Fra i vantaggi offerti dallo *stone wash* enzimatico rispetto al solo uso di pietra pomice, si possono citare i seguenti:

- tempi di trattamento ridotti;
- minimizzo dei danni alle macchine;
- aumentata carica delle macchine per ogni ciclo di lavorazione, con aumentata produttività della lavanderia;
- riduzione delle seconde scelte, dovute a strappi causati dalle pietre;
- sostanziale diminuzione e perfino eliminazione della produzione di polveri di pomice, da smaltire come rifiuto solido o residuo nelle tasche;
- maggior costanza e riproducibilità del trattamento di *stone wash*, con anche maggior flessibilità di trattamenti e di *look* finali che si possono ottenere;
- minore intensità di lavoro manuale in lavanderia;
- maggior versatilità nell'uso delle macchine;
- nel caso di formulazioni liquide di cellulasi, possibilità di sfruttare sistemi di dosaggio automatici e computerizzati;
- migliorate condizioni ambientali e di lavoro in lavanderia.

Il trattamento di *stone wash* enzimatico eseguito in lavanderia deve comunque considerare diversi aspetti prima di decidere sul tipo di enzima da impiegare, le sue condizioni di utilizzo ed il ciclo di lavorazione da seguire.

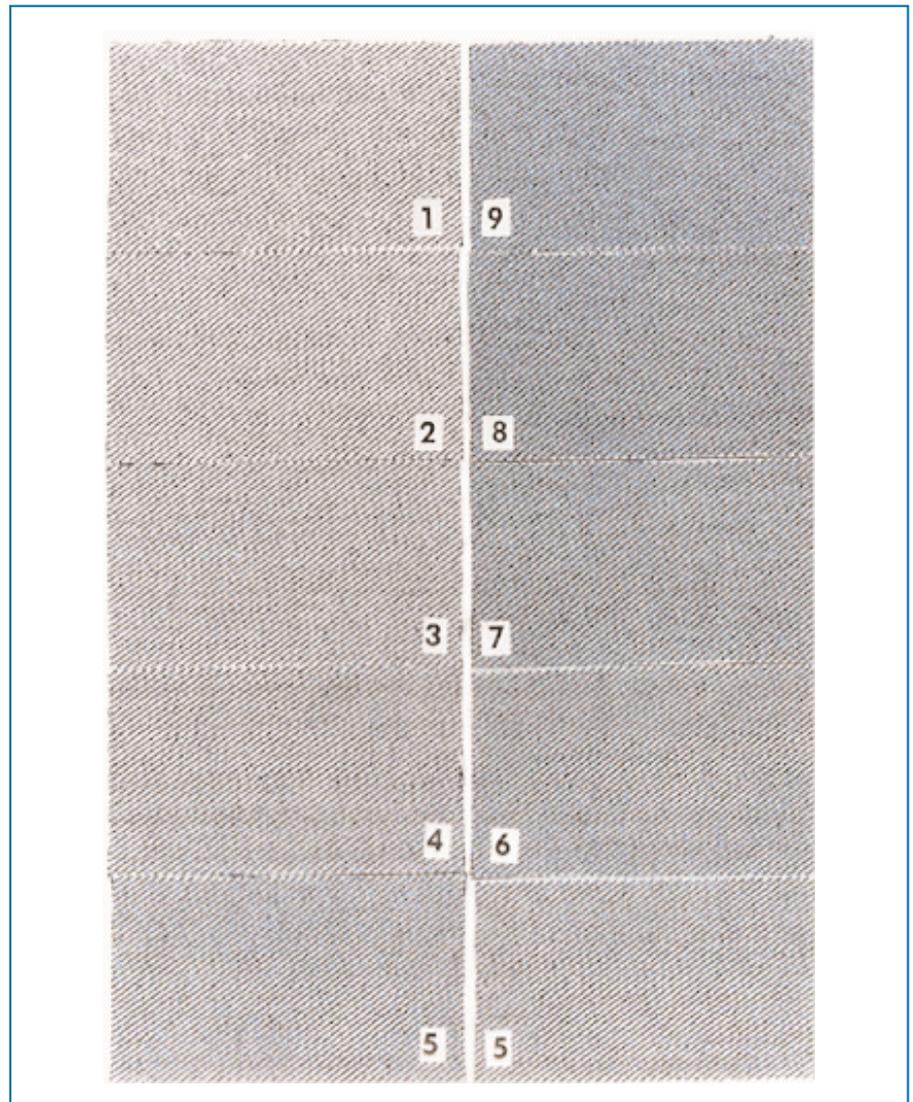


Figura 4 - Scala di rideposito sul denim

I seguenti sono solo alcuni di questi aspetti:

- il livello desiderato di abrasione del capo e di rideposito tollerato;
- le caratteristiche complessive del *look* finale ricercato (ad esempio, blu più o meno intenso, più piatto, più sgranato, più contrastato ecc.);
- la riproducibilità di prestazione dell'enzima da lotto a lotto di prodotto, anche in funzione dell'intero processo, del modello di macchina, del tipo di *denim* trattato ecc.;
- la forma fisica del prodotto enzimatico usato (liquida o solida), quindi la sua facilità e sicurezza d'uso, eventuali sistemi di alimentazione automatica, stabilità nel tempo alle condizioni di stoccaggio ecc.;
- le condizioni d'uso della particolare cellulasi usata (ad esempio, dosaggio, pH, tempo, rapporto bagno,

- inattivazione post-lavaggio ecc.);
- il costo non tanto dell'enzima, ma dell'intero processo di *stone wash* in funzione delle molte variabili citate più sopra.

Il biopolishing e biofinishing di tessuti e capi

Il *biopolishing* o *biofinishing* con cellulasi viene effettuato sia su pezze che su capi confezionati e si può comparare ad un "bruciapelo" enzimatico, eseguito prima di tintura o anche dopo tintura anche per dare una sorta di effetto *delavé*. È una pratica largamente usata su capi confezionati, senza alternativa tecnologica, mentre su pezza può essere usato il bruciapelo tradizionale.

Tuttavia, in quest'ultimo caso, non si ottiene quel particolare effetto di mano



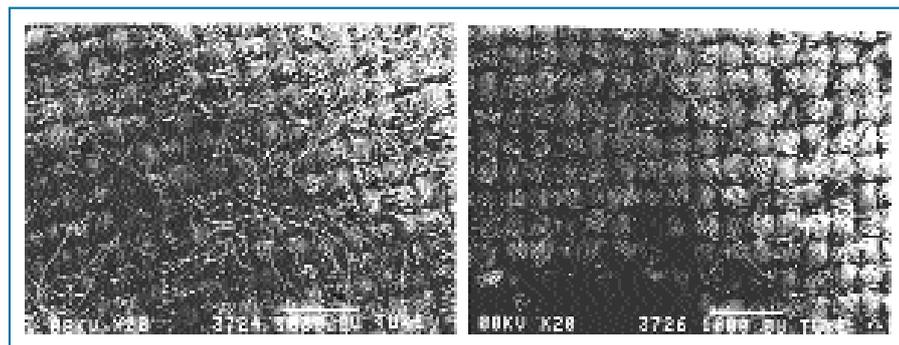


Figura 5 - Tessuto di fibra cellulosica prima e dopo defibrillazione con cellulasi

morbida ottenibile con cellulasi.

Trattamenti di *biopolishing* enzimatico con cellulasi permettono:

- l'eliminazione del cotone morto o immaturo, dei *nep* e della peluria superficiale;
- un ammorbidimento "naturale", con miglioramento di mano e del drappaggio;
- la prevenzione permanente del riformarsi di fibrillazione e *pilling*;
- un aumento dell'idrofilia, particolarmente nel caso dei tessuti di spugna;
- un migliore pulitura e brillantezza, oltre che uniformità di tintura;
- una migliore qualità complessiva dell'articolo;
- la possibilità di creare finissaggi ed effetti moda nuovi ed originali;
- di sfruttare un processo interamente ecologico.

La Figura 5 riporta un esempio di tessuto esaminato in microscopia elettronica prima e dopo trattamento con cellulasi.

Il trattamento cellulosico di *biopolishing* può essere effettuato su tessuto a maglia o a navetta, come anche su capo o maglieria, ovviamente negli opportuni macchinari ed in condizioni operative appropriate.

Si può eseguire prima o dopo candeggio, oppure anche dopo tintura o stampa. Sarebbe anche possibile l'esecuzione del trattamento durante la fase di tintura, ma a patto che le condizioni del bagno siano compatibili con le caratteristiche biochimiche dell'enzima usato e che il colorante non ne inibisca l'attività.

I macchinari da impiegare sono gli stessi ben conosciuti nell'industria tessile e tintoria, quali: *jet*, *flow*, *jigger* oppure lavatrice industriale nel caso di capi confezionati. In ogni caso, è indispensabile esercitare una vigorosa azione meccanica che deve necessa-

riamente complementarsi all'azione enzimatica. Grazie anche ai recenti sviluppi in campo mecano-tessile, esistono già sul mercato nuove macchine di preparazione e finissaggio che precedono un trattamento enzimatico nei loro cicli di lavorazione e permettono di esercitare un'energica azione meccanica (ad esempio, Then, Krantz, Thies, Biancalani ed altre). Qualunque sia la cellulasi commerciale utilizzata ed il tipo di macchinario impiegato, i principali parametri operativi da considerare sono: pH, dosaggio dell'enzima, temperatura, tempo, caricamento, rapporto bagno, azione meccanica, presenza di ausiliari chimici opportuni.

Anche in questo caso, conviene sempre arrestare l'attività dell'enzima a fine trattamento, mediante disattivazione con pH e/o alta temperatura.

È anche sempre raccomandabile eseguire prove di laboratorio su piccola scala, prima di passare a quella industriale per trattare grosse partite di merce.

A differenza dei tessuti *denim*, di cui pur esistono molte tipologie, i tessuti cellulosici non *denim* comprendono un amplissimo spettro di fibre (dal cotone al lino, alle nuove viscose come Tencel ecc.), con una sconfinata varietà di miste, pesi ed armature, per cui non è possibile precisare in dettaglio una particolare ricetta e condizioni di processo. Ogni lavorazione va ottimizzata.

Tuttavia, al di là della natura e della tipologia del tessuto da trattare, mediante *biopolishing* si vuole pur sempre ottenere il massimo di defibrillazione e pulizia superficiale del tessuto, minimizzandone la sua perdita in peso e di resistenza causata dall'azione enzimatica. Infatti, nei trattamenti di *biopolishing* si usano quasi esclusivamente cellulasi acide.

Visto che queste, soprattutto quando si opera con una vigorosa azione meccanica, sono molto più "aggressive" sulla fibra rispetto alle cellulasi neutre molto usate in *stone wash*, è sempre possibile che si verifichino perdite eccessive di peso e resistenza del tessuto.

Diventa quindi importante minimizzare queste perdite, particolarmente nel caso di maglia delicata di cotone, di lino e di viscose leggere.

Nel caso del lino, si tratta di una fibra cellulosica intrinsecamente molto forte, ma che viene macerata all'origine e che può essere facilmente indebolita da azione cellulolitica, grazie al suo alto contenuto in cellulosa amorfa e basso grado di polimerizzazione.

Analogamente, le viscose hanno un grado di polimerizzazione, cristallinità ed orientamento più basso del cotone ed allo stato umido l'effetto di cellulasi può essere quello di indebolirle.

Di conseguenza, l'uso di preparazioni di cellulasi acide "tradizionali" (vale a dire comprendenti l'intero complesso multienzimatico naturale) va considerato con attenzione, soprattutto quando si devono trattare tessuti delicati o fibre miste.

Le nuove cellulasi offerte per *biopolishing* sono quindi tutte in varia misura modificate (MOD) per contenere una maggiore percentuale di attività endocellulasi (EG) rispetto ad eso-cellulasi (CBH), oppure sono completamente prive di queste ultime.

Ad esempio, mentre nel complesso cellulosico naturale da *Trichoderma reesei* le due CBH costituiscono il 70% circa delle subunità, i nuovi prodotti cellulosici hanno un contenuto in EG di quasi il 100% (con alta % di EG-I ed EG-II), in totale assenza di CBH.

Questi enzimi, formulati in prodotti commerciali, dimostrano una migliore prestazione in *biopolishing* su ogni tipo di tessuto, ma particolarmente su miste, maglia di cotone leggera, lino e viscose o Tencel.

La scelta della migliore preparazione di cellulasi da usare dovrebbe perciò basarsi in ogni caso concreto su una buona conoscenza del tipo di fibra e del tessuto da trattare, della sua armatura, del peso ecc., oltre ovviamente dipendere dalle caratteristiche che si desiderano nell'articolo finale. Per quanto detto prima, anche l'azione meccanica esercitata deve essere bilanciata con tipo e dosaggio di enzima, tempo e pH di processo.

