



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
ECOLE NATIONALE SUPERIEUR D'ARTS ET METIERS - CLUNY
Dottorato di ricerca in - *Doctorat ENSAM en*
"Economia, Pianificazione Forestale e Scienze del Legno" - XV ciclo
"Mécanique des métiers de l'Ingénieur"

**Superficie del legno ottenuta mediante fresatura:
studio delle meccaniche di formazione e dei relativi
difetti**

***Surfaces de bois obtenues par défonçage:
étude de la mécanique de formation et des défauts
induits***

Tesi presentata per il conseguimento del titolo di DOTTORE DI RICERCA

Candidato/ *Candidat*: GIACOMO GOLI

Firenze - 26 Novembre 2003

Il contenuto di questo volume può essere liberamente utilizzato da chiunque e per qualsiasi scopo, anche per dimostrare che chi l'ha scritto è un incapace, purché sia sempre citata la fonte.

A Laura,
cui questa tesi deve molto
A chi lotta
che spicchi il volo
o sprofondi
A quel sorriso stupido
che ci fa dimenticare
tutte le violenze
di questo mondo
A chi ne ha bisogno
Ma soprattutto
a chi non vorrebbe

Summary

Wood surface processed by shaping: study of the surface formation mechanics and of the induced defects

People working with wood know very well the surface quality differences between processing “with the grain” or “against the grain”. This principle until now has been considered mainly at an empiric level, although it is very important for the surface quality. This research aims towards a scientific approach to the surface formation mechanics, surface description, surface quality measurement and surface quality prediction, as influenced by the angle between wood grain and processing plane.

Research until now did not pay enough attention to this matter, possibly because the cutting operations were executed mainly along the grain. Today the large use of CNC machines and the decrease of their price, facilitates the machining according to complex shapes. Because of this the problem of the grain orientation during the machining is becoming more and more important. Processing the same wood with the same settings leads to quite different final qualities depending on the grain orientation. For this reason a new approach to the processing of wood is needed, in order to unify the knowledge of the material and the process.

This research has been carried out in several phases. Firstly we executed some preliminary tests in order to have the feeling of the defects and of the surface evolution when changing the cutting settings and the grain angle. After having defined optimal cutting settings we carried out tests on three species (douglas fir, oak and beech) at different grain angles (increasing by steps of 10°), processing “with” and “against the grain”, “up-” and “down-milling”. We studied the defects by visual grading using the ASTM standard D1666-87, to which we added two new defect definitions. We also analysed the surfaces by means of an optical stereoscope and a SEM microscope. For each surface orientation, and for each cutting angle, we measured the principal and the normal cutting force by means of a tri-axial dynamometric platform. Finally for each surface we measured the profile with a high-precision profilometer.

By means of the optical and SEM analysis we were able to suggest an interpretation of the cutting mechanics; such interpretation is also supported by the results obtained from processing and analysing the cutting forces data. The profile analysis helped us very much in evaluating the final quality and in comparing the examined processes.

In conclusion, this work offers a global approach to the wood surface formation and evaluation, through the classification of defects and irregularities. It starts by defining the defects, follows with introducing some “new” defects up to now non classified, and with the analysis of their formation mechanics; it ends with the analysis of the cutting forces and of the surface profiles. On the whole, it suggests a new approach to the analysis of wood cutting, and leads to a new bio-mechanical interpretation of the machining process.

Indice

Introduzione	xxxi
1 Generalità sulle lavorazioni del legno	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Tipi di lavorazione	1
1.3 Materiali usati nelle lavorazioni	2
1.4 Lavorazioni discordi e concordi	2
1.4.1 Lavorazioni in discordanza	2
1.4.2 Lavorazioni in concordanza	3
1.5 Lavorazioni ed angolo della fibratura	3
1.5.1 Lavorazioni eseguite a filo dritto	3
1.5.2 Lavorazioni eseguite nel senso del filo	3
1.5.3 Lavorazioni eseguite controfilo	3
1.5.4 Lavorazioni eseguite in testa	4
1.6 Materiali e metodi	4
2 Generalità su irregolarità e difetti	7
2.1 Introduzione	7
2.2 Irregolarità	7
2.2.1 Irregolarità anatomiche	8
2.2.2 Irregolarità di lavorazione	9
2.3 Difetti di lavorazione	11
2.4 Assenza di difetti ed aspetti estetico-anatomici	12
3 Classificazione con metodo visuale	19
3.1 Introduzione	19
3.2 Classificazione qualitativa dei difetti	20
3.3 Lo standard ASTM D-1666-87	20
3.4 Integrazioni e revisioni allo standard	21
3.4.1 Difetti principali	22
3.4.2 Difetti minori	25
4 Meccaniche di formazione delle superfici	31
4.1 Introduzione	31
4.2 Sollecitazioni e loro sviluppi	31
4.3 Modalità di scissione	32
4.3.1 Scissione per taglio e “superficie teorica”	33

4.3.2	Scissione con cedimento	34
4.4	“Zone di pertinenza” e “Serie meccaniche”	37
4.5	“Meccaniche di formazione” e loro classificazione	39
4.5.1	Meccaniche a taglio prevalente	39
4.5.2	Meccaniche ibride	39
4.5.3	Classificazione delle meccaniche	41
5	Qualità e meccaniche di formazione	47
5.1	Introduzione	47
5.2	Classificazione delle meccaniche	47
5.3	Meccaniche e relativi “stati conseguenti”	48
5.3.1	Meccaniche a taglio prevalente	48
5.3.2	Meccaniche ibride	49
6	Qualità ed angolo della fibratura	67
6.1	Introduzione	67
6.2	Materiali e metodi	67
6.3	Stato delle superfici e loro evoluzione	69
6.4	Douglasia	70
6.4.1	Descrizione	70
6.4.2	Analisi comparata	77
6.5	Rovere	78
6.5.1	Descrizione	78
6.5.2	Analisi comparata	81
6.6	Faggio	85
6.6.1	Descrizione	86
6.6.2	Analisi comparata	88
6.7	Evoluzione generale delle superfici	92
6.7.1	Lavorando nel senso del filo in discordanza	93
6.7.2	Lavorando controfilo in concordanza	93
6.7.3	Lavorando nel senso del filo in concordanza	94
6.7.4	Lavorando controfilo in concordanza	94
7	Qualità e metodi oggettivi di misura	103
7.1	Introduzione	103
7.2	Generalità sull’analisi dei profili	103
7.3	L’analisi dei profili sul legno	104
8	Conclusioni	109
8.1	Conclusioni sintetiche	109
8.2	Conclusioni generali	109
8.3	Possibili sviluppi futuri	111
A	Surface formation and quality	117
A.1	Introduction	117
A.2	Materials and methods	118
A.2.1	The machining process	118

A.2.2	Observation with SEM	119
A.2.3	Profile measurement	120
A.3	Results	120
A.3.1	Macroscopic analysis	120
A.3.2	Analysis with SEM	121
A.3.3	Profile analysis	124
A.4	Conclusions	128
A.5	Bibliography	129
B	Cutting forces	131
B.1	Introduction	131
B.2	Materials and methods	132
B.2.1	The machining process	132
B.2.2	Cutting forces measurement and acquisition	133
B.2.3	Cutting forces analysis	134
B.3	Results	137
B.3.1	Processing up-milling	137
B.3.2	Processing down-milling	137
B.3.3	Comparison between processing up- and down milling	138
B.3.4	Up- and down-milling Douglas fir at different depths	139
B.3.5	Up- and down-milling different species	140
B.4	Conclusions	142
B.5	Bibliography	143
C	Analisi SEM	145

Elenco delle figure

1.1	Schema riassuntivo delle lavorazioni eseguite nel senso del filo o controfilo, rispettivamente lavorando in concordanza, o in discordanza — Schéma d'usinage dans le sens du fil et contre fil, en opposition et en avalant. [Goli]	3
2.1	Vasi grandi su un campione di quercia lavorato a filo dritto (0°); ripreso a basso ingrandimento (a), a medio ingrandimento (b) e ad elevato ingrandimento (c). — Gros vaisseaux dans un échantillon de chêne usiné en droit fil (0°) à grossissement faible (a), moyen (b) et grand (c). [Foto Goli]	9
2.2	‘Irregolarità di lavorazione’ chiaramente visibili, riprese a medio ingrandimento su quercia e douglasia, e a basso ingrandimento su un elemento profilato di pioppo. Il numero indica l’inclinazione della fibratura ed il ‘-’ davanti indica che la lavorazione è stata eseguita controfilo. — Irrégularités visibles d’usinage reprises à grossissement moyen sur du chêne (a), du douglas (b), et à bas grossissement sur une pièce de peuplier. Le numéro donne l’angle du fil par rapport au plan d’usinage, le signe ‘-’ indique un usinage à contre-fil. [Foto Goli]	10
2.3	Effetto lucido (a,b,c) ed effetto opaco (d,e,f) su quercia e douglasia; ripreso a basso ingrandimento (a,d), a medio ingrandimento (b,e) e ad elevato ingrandimento (c,f). — Effet brillant (a,b,c) et effet mat (d,e,f) dans le chêne et le douglas à grossissements faibles (a,d), moyens (b,e) et grands (c,f). [Foto Goli]	10
2.4	Irregolarità di lavorazione non percettibili rilevate su faggio e douglasia; riprese a medio (a,b) e ad elevato ingrandimento (c) — Irrégularités d’usinage non perceptibles sur du hêtre et du chêne à grossissement moyen (a,b) et grand (c). [Foto Goli]	11
2.5	‘Assenza di difetti’ ed ‘aspetti estetico-anatomici’ ripresi a basso ingrandimento — Absence de défaut. Aspects esthetico-anatomiques à faible grossissement. [Foto Goli]	13
3.1	Classificazione della ‘Fibra rialzata’ come da standard ASTM D-1666-87 — Classification des “Fibres soulevées” selon la norme ASTM D1666-87. (Le immagini sono tratte direttamente dalla norma)	22

3.2	Classificazione della ‘Fibra lanuginosa’ come da standard ASTM D-1666-87 — Classification des “Surfaces pelucheuses” selon la norme ASTM D1666-87. (Le immagini sono tratte direttamente dalla norma)	22
3.3	Classificazione della ‘Fibra strappata’ come da standard ASTM D-1666-87 — Classification des “Fibres arrachées” selon la norme ASTM D1666-87. (Le immagini sono tratte direttamente dalla norma)	23
3.4	Classificazione dei ‘Segni di trucioli’ come da standard ASTM D-1666-87 — Classification des “Marques de copeaux” selon la norme ASTM D1666-87. (Le immagini sono tratte direttamente dalla norma)	23
3.5	Classificazione della ‘Fibra schiacciata’ nei 3 gradi previsti dallo standard ASTM D-1666-87; al fine di mostrarne una descrizione completa se ne riporta anche un grado 5 — Classification des ‘Fibres comprimées’ suivant les 3 degrés prévus par la norme. [Foto Goli].	24
3.6	Classificazione della ‘Fibra embriciata’ nei 3 gradi previsti dallo standard ASTM D-1666-87; al fine di mostrarne una descrizione completa se ne riporta anche un grado 5 — Classification des ‘Fibres retournées’ suivant les 3 degrés prévus par la norme. [Foto Goli]	25
3.7	Classificazione dei difetti minori, ripresi a medio (legno primaverile sporgente) e ad elevato ingrandimento (raggi infossati, vasi uncinati). Tali difetti, essendo ‘non gradabili’ non prevedono la divisione in gradi di intensità — Classification des défauts secondaires “Bois de printemps proéminent” (a), “Vaisseaux rappeurs” (b), Rayons enfoncés (c). [Foto Goli]	26
4.1	Il cerchio delle forze di Ernst e Merchant mostra l’insieme delle sollecitazioni eseguendo il taglio con moto rettilineo. La reazione offerta al taglio è rappresentata da -R da scomporre in -Fs e -Fn. N: forza normale alla faccia dell’utensile, T: forza di attrito truciolo-utensile R: risultante, Fs: forza di scorrimento, Fn: forza normale al piano di scorrimento, Fz: forza principale, Fx: resistenza all’avanzamento. Shear angle: angolo di scorrimento, Shear plane: piano di scorrimento — Cercle des forces de Ernst et Merchant. [Schema Goli]	33
4.2	‘Scissione per taglio’ e ‘scissione con cedimento’ su legno di Douglasia equilibrato all’11% di umidità — “Séparation par cisaillement” et “séparation par endommagement” dans du douglas à H = 11%. [Foto Goli]	33
4.3	“Scissione per taglio”, produttore un truciolo di tipo II. Schema riportante sollecitazioni e reazioni durante il taglio (a) [Schema Goli]. Foto di una lavorazione produttore un truciolo di ‘Tipo II’ tra quelli descritti da Franz, implicante cioè una ‘scissione per taglio’ (b) — Séparation par cisaillement avec un copeau de type II. Schéma des sollicitations et réactions pendant la coupe (a). Copeau de type II (b). [Foto Woodson and Koch].	34
4.4	‘Scissioni con cedimento’, causate da diverse meccaniche come la compressione in (a), e la formazione di trucioli di ‘Tipo I’ [Franz] in (b) — Séparation par endommagement par compression (a), et formation de copeau de type I (b). [Foto Woodson and Koch].	35

4.5	Schemi delle lavorazioni con reazione a trazione trasversale eseguite “controfilo” (a) e “a filo dritto” (b) e delle sollecitazioni conseguenti — Schéma d’usinage avec réaction en traction transversale usinant à contre-fil (a) et en droit fil (b). [Schema Goli].	36
4.6	Schemi delle lavorazioni con reazione a compressione trasversale eseguite “nel senso del filo” (a) e “di testa” (b) e delle sollecitazioni conseguenti — Schéma d’usinage avec réaction en compression usinant dans le sens du fil (a) et en bout (b). [Schema Goli].	37
4.7	Si noti come le rotture nella parte alta (per trazione trasversale e flessione) non influenzino lo stato della superficie e quindi non facciano parte dalla così detta ‘zona di pertinenza’ — Zone fonctionnelle : les fractures ne représentent pas un problème pour la qualité de la surface usinée. [Schema Goli]	37
4.8	Si noti come in (a) le rotture nella parte alta non abbiano la minima influenza sulla qualità superficiale [Foto Koch]. In (b) si ha invece una superficie in cui si è interrotta la lavorazione, anche qui si noti come i difetti presenti nella parte alta dell’arco di cerchio percorso dalla lama non siano presenti sulla superficie — Zone fonctionnelle : ce qui apparaît en haut ne représente pas un problème pour la qualité de la surface usinée. [Foto Goli].	38
4.9	Schematizzazione del concetto di “Serie meccanica”. Si noti come il difetto si origini con una meccanica per “reazione a trazione” e poi la rottura avvenga per flessione — Schéma du concept de “succession mécanique”. Origine du défaut en traction transversale et évolution par une rupture en flexion. [Schema Goli]	38
4.10	Si illustrano le due classi principali: per ‘spostamento di materia’ su pioppo nero (a) dove nonostante il fatto che la materia sia spostata rimettendola al suo posto si riesca a ricreare la superficie, e per ‘distacco di materia’ (b) in cui si vede che la materia è stata asportata completamente dalla superficie — Formation de défauts par déplacement de matière sur du peuplier (a) et par enlèvement de matière sur du douglas (b). [Foto Goli]	40
4.11	Si riporta a titolo di esempio una meccanica secondaria con ‘rottura a flessione’ (a) su quercia ed una per rottura a ‘cedimento plastico’ (b) su douglasia — Exemples de mécaniques secondaires : rupture en flexion sur du chêne (a) et par endommagement plastique sur du douglas (b). [Foto Goli]	41
5.1	Superfici ottenute con meccaniche agenti “per taglio prevalente” su quercia (a) e douglasia (b) fotografate a basso ingrandimento. Si noti come lo ‘stato conseguente’ della superficie sia la ‘superficie teorica’, e siano quindi caratterizzate dall’assoluta ‘assenza di difetti’ — Surfaces de bonne qualité obtenues par coupe prédominante dans du douglas (a) et du chêne (b). L’état induit est la “surface théorique” et la surface est caractérisé par une complète absence de défauts. [Foto Goli]	49

- 5.2 Visione generale del problema della ‘fibra lanuginosa’. Un caso estremamente flagrante su pioppo nero (a) ascrivibile alla variante 1, e due casi importanti su douglasia ascrivibili alla variante 1 (b) e alla variante 2 (c). Si noti come essendo una meccanica che si origina per spostamento di materia, rimettendo al loro posto le fibre sollevate si otterrebbe qualcosa di molto simile alla ‘superficie teorica’. Si noti inoltre come nel pioppo la problematica interessi senza distinzione legno primaverile ed estivo, mentre nella douglasia sia ad esclusivo carico del legno primaverile — Surfaces pelucheuses var. 1 sur peuplier (a) et sur douglas (b), et var 2 sur douglas (c). [Foto Goli] 50
- 5.3 ‘Fibre lanuginose’ di tipo A1 var. 1 su douglasia. Si noti la diversità tra differenti fasci di fibre sollevati (a). In (b) si noti come la compressione sugli elementi rigirati (raddrizzati prima della foto) abbia creato una nicchia di compressione. In (c) è ben visibile invece, sul lato destro l’azione di compressione sugli elementi cellulari esercitata dal coltello nel passaggio, mentre a sinistra la zona di sollevamento per trazione trasversale con gli elementi cellulari è in perfette condizioni — Surfaces pelucheuses type A1 var. 1 sur douglas (a). Dans (b) la niche provoquée par la compression de la fibre sur la surface pendant le passage du couteau est bien visible. Dans (c) la partie où la fibre a été arrachée (gauche) et la partie où elle a été comprimée (droite) sont bien visibles. [Foto Goli] 51
- 5.4 ‘Fibre lanuginose’ di tipo A1 var. 2 su Douglasia. Si noti la maggiore cottonosità e regolarità di distribuzione in (a). In (b) e (c) si osserva chiaramente la maggiore uniformità di queste fibre nonché la minore compressione esercitata dal coltello durante il passaggio sulla superficie — Surfaces pelucheuses type A1 var. 2 sur douglas (a). La var. 2 présente une distribution plus uniforme des fibres et une plus faible compression des fibres. [Foto Goli] 52
- 5.5 ‘Fibra schiacciata’ di tipo B1 su Douglasia fotografata a basso (a), medio (b) ed elevato (c) ingrandimento. Alla figura (a) si è sovrapposto il profilo misurato con rugosimetro. Le fibre sono schiacciate di lato e rimangono estremamente rigide al tatto — Fibres comprimées dans du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). Les fibres sont très rigides sur la surface. [Foto Goli] 53
- 5.6 “Legno primaverile sporgente” di tipo C1 fotografato su Douglasia a differente ingrandimento. Si osservi in (a) come la superficie sia di buona qualità anche se il profilo rende evidente le gobbe che si intravedono ad occhio nudo. Il fenomeno è ancora più evidente in (b), legno primaverile a sinistra ed estivo a destra, ed in (c), legno primaverile sopra e legno estivo sotto — Bois de printemps proéminent sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli] . . . 54

- 5.7 ‘Vasi uncinati’ ripresi a medio ed alto ingrandimento su legno di quercia. Si noti come nella parte sinistra il bordo del vaso risulti sporgente a causa del ritorno elastico (a) e (b). In (c) si osserva invece un vaso completamente ricoperto lavorando a 70°. Per angoli così elevati la meccanica è diversa, con un maggior contributo di componenti plastiche ma vista la sua scarsa importanza si è preferito non classificarla a parte — *Vaisseaux rappeurs sur du chêne observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c)*. [Foto Goli] 55
- 5.8 ‘Fibra rialzata’ di tipo D1 a medio ed alto ingrandimento su legno di douglasia. Si noti come il legno estivo abbia ceduto e rimanga piegato su un lato per cedimento di tipo plastico. In (b) la fascia chiara ben visibile al limite destro del legno estivo rappresenta la parte compressa dal coltello, e soltanto l'estremità di questa rimane sporgente sopra il legno primaverile (c) — *Fibres soulevées sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c)*. [Foto Goli] 55
- 5.9 ‘Fibre pettinate’ di tipo D2 su quercia (a,b) e douglasia (c). Si osservi in (a) come nelle parti a minor densità (attorno ai vasi) le fibre risultino schiacciate e piegate su un lato in maniera ben visibile, mentre in quelle a maggior densità il fenomeno è percepibile come ‘superficie lucida’. La stessa cosa è maggiormente visibile in (b). In (c) si noti come il lume cellulare delle fibrotracheidi della douglasia risulti completamente schiacciato — *Fibres couchées sur du chêne (a, b) et du douglas (c)*. [Foto Goli] 56
- 5.10 ‘Fibre strappate’ di tipo omogeneo (E1) ed eterogeneo (E2) su legno di douglasia. Si noti come in (a) gli strappi siano esclusivamente a carico del legno estivo senza interazione col legno primaverile mentre in (b) anche se sempre a carico del legno estivo, il primaverile giochi un ruolo importante nella meccanica di formazione — *Fibres arrachées de type homogène (a), et hétérogène (b)*. [Foto Goli] 58
- 5.11 ‘Fibre embriciate’ strappate di Tipo E3 su quercia (a) e douglasia (b, c). In (a) è ben visibile il distacco di materia rispetto alla superficie teorica. Si noti a maggiore ingrandimento (b) come sia chiara la successione di asportazione delle lamelle e la modalità di rottura (c) — *Fibres retournées de type arrachées sur du chêne (a) et du douglas (b, c)*. [Foto Goli] 59
- 5.12 Fibre sfilate su douglasia. Si osserva chiaramente in (a) l'insieme delle nicchie da strappo nonché la contemporanea presenza del ‘legno primaverile sporgente’. A maggiore ingrandimento (b) risulta chiaro lo sfilamento dei fasci di fibre e la loro rottura a trazione longitudinale e la presenza di nicchie di sfilamento (c) — *Fibres arrachées par glissement sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c)*. [Foto Goli] 60
- 5.13 ‘Strappi primaverili profondi’ di tipo F2 var. 1 su douglasia. Si noti come il legno primaverile sia quasi interamente strappato, mentre l'estivo non presenti particolari problemi — *Arrachements profonds dans le bois de printemps type F1 var. 1 sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c)*. [Foto Goli] 61

- 5.14 'Strappi primaverili profondi' di tipo F2 var. 2 su douglasia. Si noti come il legno primaverile, anche se presente, sia rotto e separato dalla superficie — Arrachements profonds dans le bois de printemps type F1 var. 2 sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli] 61
- 5.15 'Fibre embriciate' incombenti di tipo G1 su quercia (a) e douglasia (b, c). Si noti in (a) come molte lamelle siano comunque strappate, classificando la meccanica come 'modalità mista'. In (b) si noti come tale meccanica sia a carico del legno più denso, e quindi in questo caso ad esclusivo carico del legno estivo, mentre il primaverile non ne risulta affetto. Si noti infine come in (c) sia ancora ben visibile il segno della compressione del coltello che determina la lamella e ne causa il sollevamento — Fibres retournées de type non arrachées type G1 sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli] 63
- 6.1 Schema del metodo utilizzato per la variazione dell'angolo della fibratura nella lavorazione. Si esegue il taglio all'angolo della fibratura desiderato, dopo di che ruotando il pezzo si se stesso si lavora la stessa superficie "nel senso del filo" e "controfilo". — Méthode utilisée pour faire varier l'angle du fil dans l'usinage des surfaces. On coupe avec l'angle du fil souhaité et après on tourne la pièce sur elle même pour usiner la même surface "dans le sens du fil" et "contrefil" [Schema Goli] 69
- 6.2 Schema di riferimento per la lettura delle figure a seguire — Schéma pour le repérage des figures qui suivent. [Schema Goli] 70
- 6.3 Le due superfici (a e b) sono uguali, a testimonianza che ripetendo il test dopo aver ruotato su se stesso il pezzo, cioè lavorando con lo stesso angolo della fibratura il risultato è lo stesso. La scissione in questo caso è avvenuta per 'taglio prevalente' — Est clair que la 'séparation' est par coupe 'prédominante'. Les deux surfaces sont usinées après avoir retourné la pièce de 180° sur elle même, pour montrer que le fil est droit et que le résultat est répétable. [Foto Goli] 74
- 6.4 Nel senso del filo (a): sul legno primaverile sono ben visibili 'strappi per sfilamento', che si presentano più intensi lavorando in concordanza. Controfilo (b) si osserva il problema della 'fibra lanuginosa' nella var. 1 lavorando in discordanza e nella var. 2 lavorando in concordanza — Le problème principal usinant dans le sens du fil est celui des 'fibres arrachées par glissement', qui sont plus importants usinant en avalant que en opposition. Contrefil le défaut principal est celui des 'surfaces pelucheuses' dans le deux variantes A et B usinant en opposition ou en avalant. [Foto Goli] 74
- 6.5 Nel senso del filo (a): peggioramento della qualità ed aggravamento degli 'strappi per sfilamento', più intensi lavorando in concordanza. Controfilo (b): si passa alla 'fibra pressata', anche se si continua a vedere qualche 'fibra lanuginosa' sia nella var. 1 che nella var. 2 — La surface est caractérisé par les mêmes défauts que avant mais qui devient plus importants. [Foto Goli] 74

- 6.6 Nel senso del filo (a): ancora peggioramento degli ‘strappi per sfilamento’ anche se la differenza qualitativa tra le superfici ottenute lavorando in ‘concordanza’ o in ‘discordanza’ si è ridotta. Controfilo (b): ben visibile la ‘fibra pressata’ lavorando in discordanza e la ‘fibra embriciata strappata’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil la surface est caractérisé par les mêmes défauts que avant mais qui devient plus importants. Contre fil sont bien visibles le défauts des ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et celui des ‘fibres retournées’ usinant en avalant. [Foto Goli] 75
- 6.7 Nel senso del filo (a): gli ‘strappi per sfilamento’ iniziano ad assumere la forma di ‘strappi primaverili profondi’. Il risultato è simile, lavorando in concordanza o in discordanza. Controfilo (b): si manifestano le ‘fibre schiacciate’ lavorando in discordanza e le ‘fibre embriciate strappate’ sul legno estivo e le ‘fibre schiacciate’ sul primaverile lavorando in concordanza. Le ‘fibre embriciate strappate’ risultano meno intense rispetto a quelle della superficie precedente — Encore des ‘fibres arrachées par glissement’ usinant dans le sens du fil en train de devenir des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contrefil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et ‘fibres retournées’ en avalant. [Foto Goli] 75
- 6.8 Nel senso del filo (a): si converge sempre di più verso gli ‘strappi primaverili profondi’ tanto che si iniziano a distinguere la var. 1 e la var. 2. Controfilo (b): viene meno la ‘fibra embriciata’ e si ha una forte ‘fibra pressata’ per entrambe le lavorazioni — Douglas usinée en avalant et opposition à 50° et -50°. Dans le sens du fil ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ var. 1 et 2. Contrefil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et en avalant. [Foto Goli] 75
- 6.9 Nel senso del filo (a): affermazione degli ‘strappi primaverili profondi’ nelle due varianti 1 e 2. Il legno estivo continua ad essere di buona qualità. Controfilo (b): inizia la manifestazione degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in discordanza, mentre in concordanza si ha ancora la ‘fibra pressata’, con qualche accenno alla ‘fibra embriciata’ — Dans le sens du fil ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ var. 1 et 2. Contrefil ‘fibres comprimées’ et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en opposition. ‘Fibres comprimées’ usinant en avalant. [Foto Goli] 76
- 6.10 Nel senso del filo (a): ‘strappi primaverili profondi’ nelle varianti 1 e 2 sul primaverile, l’estivo risulta di ottima qualità. Controfilo (b): affermazione degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in discordanza e della ‘fibra embriciata incombente’ (sul legno estivo) lavorando in concordanza. Sul primaverile, lavorando in concordanza si ha ancora la ‘fibra embriciata’ — Dans le sens du fil ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ dans les variantes 1 et 2. Contre fil formation des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en opposition et des ‘fibres retournées’ et des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en avalant. [Foto Goli] 76

- 6.11 Nel senso del filo (a): ancora ‘strappi primaverili profondi’ var. 1 e 2 sul primaverile e legno estivo di buona qualità. Controfilo (b): ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in discordanza, mentre in concordanza ‘fibra embriciata incombente’ sul legno estivo e ‘fibra pressata’ sul primaverile — Dans le sens du fil ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ dans les variantes 1 et 2. Contre fil formation des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en opposition et des ‘fibres retournées’ et des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en avalant. [Foto Goli] 76
- 6.12 Lavorazione di testa (a e b). I risultati ottenuti sono uguali lavorando la superficie in un senso e dopo averla rigirata su se stessa, a dimostrazione della ripetibilità del test. Presenti in tutti i casi gli ‘strappi primaverili profondi’ nelle varianti 1 e 2. Il legno estivo risulta di ottima finitura. Tendenza occasionale al manifestarsi di ‘fibre embriciate’ lavorando in concordanza — Le défaut principal est constitué par les ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. [Foto Goli] 77
- 6.13 Le due superfici sono uguali (a e b), a testimonianza che ripetendo il test dopo aver ruotato su se stesso il pezzo, cioè lavorando con lo stesso angolo della fibratura il risultato è lo stesso. La scissione in questo caso è avvenuta per ‘taglio prevalente’ — Est clair que la séparation est par ‘coupe prédominante’. Les deux surfaces sont usinées après avoir retourné la pièce de 180° sur elle même, pour montrer que le fil est droit et que le résultat est répétable. [Foto Goli] 82
- 6.14 Nel senso del filo (a): si inizia a percepire il processo di compressione. Ancora non è un vero e proprio ‘effetto lucido’. Stesso aspetto sia lavorando in discordanza che in concordanza. Talvolta si manifestano i ‘vasi uncinati’. Controfilo (b): si nota chiaramente quel processo di sollevamento che porta all’effetto opaco. Presenza di microstrappi lavorando in concordanza — Dans le sens du fil est clair un ‘effet brillant’ et on peut avoir des ‘vaisseaux crochetés’, contre fil un ‘effet mat’. On observe des petits arrachements usinant contre fil en avalant. [Foto Goli] 82
- 6.15 Nel senso del filo (a): ancora percepibile la compressione, superficie di buona qualità sia lavorando in concordanza che in discordanza. Ancora possibilità di formazione di ‘vasi uncinati’. Controfilo (b): si ha il manifestarsi di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e dei primi strappi riconducibili alla ‘fibra embriciata strappata’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil ‘effet brillant’ et possibilité d’avoir des ‘vaisseaux crochetés’. Contre fil formation des ‘fibres comprimés’ usinant en opposition et des ‘fibres retournées’ de type arrachée usinant en avalant. [Foto Goli] 82
- 6.16 Nel senso del filo (a): si osserva un chiaro ‘effetto lucido’. La qualità è comunque elevata per entrambi i processi. Controfilo (b): ancora ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza, mentre in concordanza si ha la manifestazione di un’abbondante e diffusa ‘fibra embriciata strappata’ — Dans le sens du fil on observe l’‘effet brillant’. Contre fil formation des ‘fibres comprimés’ usinant en opposition et des ‘fibres retournées’ de type arrachée usinant en avalant. [Foto Goli] 83

- 6.17 Nel senso del filo (a): ancora un effetto lucido ben visibile. Inizia a manifestarsi la ‘fibra pettinata’ nelle parti primaverili. Controfilo (b): lavorando in discordanza si ha una pessima superficie affetta da ‘fibra pressata’ e da ‘fibra strappata’. In concordanza invece si ha la formazione di ‘fibra embriciata’ in gran parte di tipo ‘strappato’ ma con la presenza di alcune lamelle di tipo ‘incombente’ — Dans le sens du fil on observe un fort ‘effet brillant’ et des ‘fibres couchées’. Contrefil on oppose les défauts principaux sont les ‘fibres comprimés’ et les ‘arrachements’, en avalant les ‘fibres retournées’ de type arrachées. [Foto Goli] 83
- 6.18 Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Rimane comunque chiaramente visibile l’‘effetto lucido’. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ e ‘fibra strappata’ lavorando in discordanza. In concordanza si ha ancora ‘fibra embriciata’ con una prevalenza della ‘strappata’ su quella ‘embriciata’ — Dans le sens du fil on observe un fort ‘effet brillant’ et des ‘fibres couchées’. Contrefil on oppose les défauts principaux sont ‘fibres comprimés’ et les ‘arrachements dans le bois de printemps’, en avalant les ‘fibres retournées’. [Foto Goli] 83
- 6.19 Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Anche se i processi aumentano di intensità, rimane comunque chiaramente visibile l’‘effetto lucido’. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ e ‘fibra strappata’ lavorando in discordanza. In concordanza si ha ancora ‘fibra embriciata’, in cui la componente ‘strappata’ diventa via via maggiormente importante — Dans le sens du fil on observe un fort ‘effet brillant’, des ‘fibres couchées’ et des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contrefil on oppose les défauts principaux sont ‘fibres comprimés’ et les ‘arrachements dans le bois de printemps’, en avalant les ‘fibres retournées’. [Foto Goli] 84
- 6.20 Nel senso del filo (a): stesse meccaniche della precedente ma che si aggravano, soprattutto per quanto riguarda gli ‘strappi primaverili’. La lavorazione in concordanza ed in discordanza porta risultati simili. Controfilo (b): come la precedente salvo che in concordanza la ‘fibra embriciata incombente’ prende il sopravvento su quella strappata — On observe les mêmes défauts que avant et la surface devient de pire en pire. [Foto Goli] 84
- 6.21 Nel senso del filo (a): aumento degli strappi primaverili, stesso risultato lavorando in discordanza ed in concordanza. Controfilo (b): superficie molto simile a quella lavorata nel senso del filo per la lavorazione in discordanza. ‘Fibra embriciata’ a prevalenza ‘strappata’ per la lavorazione in concordanza — On observe les mêmes défauts que avant et la surface devient de pire en pire. [Foto Goli] 84

- 6.22 Lavorazione di testa (a e b). I risultati ottenuti sono uguali lavorando la superficie in un senso e dopo averla rigirata su se stessa, a dimostrazione della ripetibilità del test. Presenti in maniera diffusa gli ‘strappi primaverili profondi’ e la superficie ha un aspetto vagamente lucido. Si ha la stessa qualità sia lavorando discordanza che in concordanza. Il legno estivo risulta di ottima finitura. Tendenza occasionale al manifestarsi di ‘fibre embriciate’ lavorando in concordanza — Les défauts principaux sont les ‘fibres comprimées’ et les ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. [Foto Goli] 85
- 6.23 Le due superfici sono uguali (a e b), a testimonianza che ripetendo il test dopo aver ruotato su se stesso il pezzo, cioè lavorando con lo stesso angolo della fibratura il risultato è lo stesso. La scissione in questo caso è avvenuta per ‘taglio prevalente’ — Est clair que la séparation est par ‘coupe prédominante’. Les deux surfaces sont usinées après avoir retourné la pièce de 180° sur elle même, pour montrer que le fil est droit et que le résultat est répétable. [Foto Goli] 89
- 6.24 Nel senso del filo (a): si inizia a percepire il processo di compressione. Si manifesta l’‘effetto lucido’. Controfilo (b): si ha il manifestarsi dell’‘effetto opaco’ sia lavorando in discordanza che in concordanza — Les défauts sont beaucoup moins faibles par rapport au douglas et au chêne. Dans le sens du fil on observe l’‘effet brillant’, contre fil l’‘effet mat’ usinant soit en avalant, soit en opposition. [Foto Goli] 89
- 6.25 Nel senso del filo (a): percepibile la compressione, la ‘fibra pettinata’ e l’‘effetto lucido’, superficie di buona qualità sia lavorando in concordanza che in discordanza. Controfilo (b): si ha il manifestarsi dell’‘effetto opaco’ sia lavorando in discordanza che in concordanza — Dans le sens du fil par rapport à l’usinage à 10° et -10° il y a plus de ‘fibres couchées’. Pour le rest il y a pas des variations sensibles. [Foto Goli] 89
- 6.26 Nel senso del filo (a): si osserva un chiaro ‘effetto lucido’ e una chiara ‘fibra pettinata’. La qualità è comunque elevata per entrambi i processi. Controfilo (b): ‘fibra schiacciata’ sia lavorando in discordanza che in concordanza — Dans le sens du fil ‘fibres couchées’, contre fil ‘fibres comprimées’. [Foto Goli] 90
- 6.27 Nel senso del filo (a): ancora un ‘effetto lucido’ e ‘fibra pettinata’ ben visibili. Controfilo (b): sia lavorando in discordanza che in concordanza inizia a manifestarsi la ‘fibra schiacciata’ — Les défauts deviens de plus en plus importants, mais ils restent les mêmes. [Foto Goli] 90
- 6.28 Nel senso del filo (a): il problema principale risulta ancora essere l’‘effetto lucido’. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ sia lavorando in discordanza che in concordanza. Lavorando in concordanza iniziano a manifestarsi gli ‘strappi primaverili profondi’ — Dans le sens du fil le problème principaux est encore l’‘effet brillant’. Contre fil le problème principaux sont les ‘fibres comprimées’ et il commencent la présence des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. [Foto Goli] 90

6.29	Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi primaverili profondi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e in concordanza, e degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil ‘fibres couchées’ et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contre fil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et avalant, et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ pour l’usinage en opposition. [Foto Goli]	91
6.30	Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi primaverili profondi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e in concordanza, e degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in concordanza — Pas de variations importantes par rapporta à la precedente. [Foto Goli]	91
6.31	Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi primaverili profondi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e in concordanza, e degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil ‘fibres couchées’ et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contre fil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et avalant, et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ pour l’usinage en opposition. [Foto Goli]	91
6.32	Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi primaverili profondi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e in concordanza, e degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil ‘fibres couchées’ et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contre fil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et avalant, et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ pour l’usinage en opposition. [Foto Goli]	92
A.1	The four main experimental conditions.	119
A.2	Douglas Fir (-40°) and Oak (-60°) processed with Down-milling technique.	121
A.3	Douglas Fir processed UP-milling, along the grain.	121
A.4	Douglas Fir processed UP-milling, against the grain.	122
A.5	Douglas Fir processed DOWN-milling, along the grain.	122
A.6	Douglas Fir processed DOWN-milling, against the grain.	122
A.7	Oak processed Up-milling, along the grain.	123
A.8	Oak processed Up-milling against the grain.	123
A.9	Oak processed Down-milling, along the grain.	124
A.10	Oak processed Down-milling, against the grain.	124
A.11	Pa values when processing Douglas Fir with Up-milling technique.	125
A.12	Pa values when processing Douglas Fir with Down-milling technique.	125

A.13 Comparison between Pa in processing Douglas Fir with Up- and Down-milling.	126
A.14 Comparison between Pt in processing Douglas Fir with Up- and Down-milling.	126
A.15 Pa values when processing Oak with Up-milling technique.	127
A.16 Pa values when processing Oak with Down-milling technique.	127
A.17 Comparison between Pa in processing Oak with Up- and Down-milling.	128
A.18 Comparison between Pt in processing Oak with Up- and Down-milling.	128
B.1 Filtered and non filtered signal while the machine is moving without processing wood (idle).	135
B.2 Filtered and non filtered signal while the machine is moving and processing a specimen with $\xi 20^\circ$	135
B.3 Autocorrelation of filtered signal processing idle and processing a specimen with a grain angle of 20°	136
B.4 Filtered signal and its autocorrelation function processing a specimen with a grain angle of 60°	136
B.5 0/90 (a) and -90/90 (b) diagrams of cutting forces up-milling Douglas fir with 0,5 mm of depth of cut.	138
B.6 0/90 (a) and -90/90 (b) diagrams of cutting forces down-milling Douglas fir with 0,5 mm of depth of cut.	138
B.7 -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir with 0,5 mm of depth of cut (a). The defect called “tilted grain” (b).	139
B.8 Changing of the angle between the rake face and the grain direction processing up- and down milling with the same grain direction (a). As can be seen in (b) the difference between the maximal chip thickness processing up- and down-milling is 20°	140
B.9 -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir with 1,5 mm of depth of cut (a) and Oak with 0,5 mm of depth of cut.	140
B.10 -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir with 0,5 and 1,5 mm of depth of cut	141
B.11 -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir and Oak with 0,5 mm of depth of cut.	141
B.12 -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir with 0,5 and 1,5 mm of depth of cut and Oak with 0,5 mm of depth of cut.	142
C.1 Immagini SEM di douglasia lavorata nel senso del filo in discordanza – Images MEB de douglas usiné dans le sens du fil en opposition — Douglas fir processed up-milling with the grain. [Foto Goli].	146
C.2 Immagini SEM di douglasia lavorata nel controfilo in discordanza – Images MEB de douglas usiné contrefil en opposition — Douglas fir processed up-milling against the grain. [Foto Goli].	147
C.3 Immagini SEM di douglasia lavorata nel senso del filo in concordanza – Images MEB de douglas usiné dans le sens du fil en avalant — Douglas fir processed down-milling with the grain. [Foto Goli].	148

C.4	Immagini SEM di douglasia lavorata contrfilo in concordanza – Images MEB de douglas usiné contrefil en avalant — Douglas fir processed down-milling against the grain. [Foto Goli].	149
C.5	Immagini SEM di rovere lavorata nel senso del filo in discordanza – Images MEB de chêne usiné dans le sens du fil en opposition — Oak processed up-milling with the grain. [Foto Goli].	150
C.6	Immagini SEM di rovere lavorata nel controfilo in discordanza – Images MEB de chêne usiné contrefil en opposition — Oak processed up-milling against the grain. [Foto Goli].	151
C.7	Immagini SEM di rovere lavorata nel senso del filo in concordanza – Images MEB de chêne usiné dans le sens du fil en avalant — Oak processed down-milling with the grain. [Foto Goli].	152
C.8	Immagini SEM di rovere lavorata contrfilo in concordanza – Images MEB de chêne usiné contrefil en avalant — Oak processed down-milling against the grain. [Foto Goli].	153

Elenco delle tabelle

3.1	Classificazione visuale	27
3.2	Specchio riassuntivo multilingue dei gradi previsti dallo standard ASTM D1666-87 — Tableau des degrés prévu par le standard ASTM D1666-87.	27
3.3	Specchio riassuntivo multilingue dei difetti “minori” — Tableau multilingue des “défauts secondaires” (Minor defects)	27
5.1	Tabella riassuntiva delle ‘meccaniche ibride’ — Tableau des mécaniques hybrides.	63
5.2	Tabella riassuntiva delle ‘meccaniche ibride’ e dei relativi stati conseguenti — Tableau des mécaniques hybrides et des états induits.	63
5.3	Tabella indicante la meccanica di formazione, il tipo di legno in cui preferenzialmente si forma, il tipo di lavorazione, le sollecitazioni ritenute fondamentali per lo sviluppo del difetto e gli angoli tipici a cui per umidità normale, o prossima ad essa è possibile riscontrare il difetto. CT: compressione trasversale, TT: trazione trasversale, F: flessione, TL: trazione longitudinale, TaL: taglio longitudinale, CL: compressione longitudinale, TaT: taglio trasversale, PP: processi plastici, PE: processi elastici — Tableau des mécaniques.	64
6.1	Materiali usati per eseguire le lavorazioni — Matériau utilisées dans les tests.	68
6.2	Parametri impostati per l’esecuzione delle prove — Paramètres d’usinage.	69
6.3	Difetti presenti sulle superfici lavorando douglasia nel senso del filo ed in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant douglas dans le sens du fil en opposition avec des angles du fil différents.	71
6.4	Difetti presenti sulle superfici lavorando douglasia nel senso del filo ed in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant du douglas dans le sens du fil en avalant avec des angles du fil différents.	72
6.5	Difetti presenti sulle superfici lavorando douglasia controfilo in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant du douglas contre fil en opposition avec des angles du fil différents.	72

6.6	Difetti presenti sulle superfici lavorando douglasia controfilo in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du douglas contre fil en avalant avec des angles du fil différents.	73
6.7	Difetti presenti sulle superfici lavorando quercia nel senso del filo ed in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du chêne dans le sens du fil en opposition avec des angles du fil différents.	79
6.8	Difetti presenti sulle superfici lavorando quercia nel senso del filo ed in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du chêne dans le sens du fil en avalant avec des angles du fil différents.	79
6.9	Difetti presenti sulle superfici lavorando quercia controfilo in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du chêne contre fil en opposition avec des angles du fil différents.	80
6.10	Difetti presenti sulle superfici lavorando rovere controfilo in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du chêne contre fil en avalant avec des angles du fil différents.	81
6.11	Difetti presenti sulle superfici lavorando faggio nel senso del filo ed in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du hêtre dans le sens du fil en opposition avec des angles du fil différents.	86
6.12	Difetti presenti sulle superfici lavorando faggio nel senso del filo ed in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du hêtre dans le sens du fil en avalant avec des angles du fil différents.	87
6.13	Difetti presenti sulle superfici lavorando faggio controfilo in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du hêtre contre fil en opposition avec des angles du fil différents.	88
6.14	Difetti presenti sulle superfici lavorando faggio controfilo in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défaux typiques usinant du hêtre contre fil en avalant avec des angles du fil différents.	88
6.15	Evoluzione dei difetti lavorando in ‘discordanza’ e ‘nel senso del filo’ — Défaux typiques usinant dans le sens du fil en opposition.	93
6.16	Evoluzione dei difetti lavorando in ‘discordanza’ e ‘controfilo’ — Défaux typiques usinant contre fil en avalant.	94
6.17	Evoluzione dei difetti lavorando in ‘concordanza’ e ‘nel senso del filo’ — Défaux typiques usinant dans le sens du fil en avalant.	94
6.18	Evoluzione dei difetti lavorando in ‘concordanza’ e ‘controfilo’ — Défaux typiques usinant cote fil en opposition.	95
6.19	Evolution générale des surfaces usinant dans le sens du fil en opposition.	100
6.20	Evolution générale des surfaces usinant contre fil en opposition.	100
6.21	Evolution générale des surfaces usinant dans le sens du fil en avalant.	101
6.22	Evolution générale des surfaces usinant contre fil en avalant.	101
A.1	Experiment set-up	118
A.2	Experiment set-up	119
A.3	Profile measurement system set-up.	120

A.4	Pt values when processing Douglas Fir with Up-milling technique (values are reported in μm).	125
A.5	Pt values when processing Douglas Fir with Down-milling technique (values are reported in μm)	126
A.6	Pt values when processing Oak with Up-milling technique (values are reported in μm .)	127
A.7	Pt values when processing Oak with Down-milling technique (values are reported in μm).	127
B.1	Experimental set-up adopted for the tests.	132
B.2	Experimental set-up adopted for the tests.	132
B.3	Experimental set-up adopted for the tests.	133
B.4	Acquisition system set-up.	134
B.5	System periodicity.	134
B.6	Analysis conditions.	134
B.7	Standard deviation in measured cutting forces.	136

Introduzione

Questa ricerca esamina i meccanismi di formazione e la qualità finale delle superfici di legno lavorate mediante asportazione di truciolo con utensili taglienti rotanti; in particolare, vengono analizzate le relazioni fra la geometria del contatto fra legno e tagliente (espressa fondamentalmente dall'angolo fra fibratura del legno e traiettoria del tagliente), e la qualità della superficie che ne risulta (espressa mediante il tipo e l'entità dei cosiddetti "difetti di lavorazione").

Chiunque lavori il legno conosce bene le differenze tra "lavorare a filo dritto", "lavorare nel senso del filo" o "lavorare controfilo". Questi concetti, anche se estremamente importanti per il risultato finale, sono finora stati considerati a livello prevalentemente empirico, soprattutto dagli addetti alle lavorazioni. Questa ricerca mira invece ad impostare un approccio globale alla genesi, descrizione e misura della qualità delle superfici ottenute lavorando a differenti angoli rispetto alla fibratura del legno.

Questo tema finora è stato poco affrontato dai ricercatori e dagli operatori del settore, che hanno la tendenza a relegarlo fra le inevitabili conseguenze dei "difetti" del legno (più o meno evitabili, a seconda del materiale usato e dei risultati desiderati). La sempre maggior diffusione delle macchine a controllo numerico rende invece normale ed inevitabile affrontare la lavorazione del legno con angoli diversi; per ottimizzare i risultati delle lavorazioni eseguite con tali attrezzature, risulta sempre più necessario conoscere approfonditamente le relazioni fra legno ed utensile, ed i meccanismi di formazione delle superfici.

La ricerca si è svolta attraverso varie fasi. Anzitutto, prima di iniziare prove e misure sistematiche, sono state eseguite numerose prove preliminari, per prendere familiarità con i difetti, comprendere le loro relazioni con l'angolo della fibratura, sviluppare un adeguato lessico per la loro descrizione e classificazione; contemporaneamente sono stati sviluppati e verificati i metodi di misura. Sono poi state eseguite le prove vere e proprie, su tre specie legnose (rovere, douglasia e faggio) aventi struttura anatomica e caratteristiche di lavorabilità assai diverse, facendo variare di 10° in 10° gradi l'angolo della fibratura, ed eseguendo la lavorazione sia in concordanza, sia in discordanza. Si è così ottenuta una casistica molto ampia sulle superfici ottenute lavorando "nel senso del filo", "controfilo", "in testa" ed a "filo dritto". Per ogni superficie ottenuta è stata eseguita l'analisi visuale, l'analisi al microscopio elettronico a scansione, l'analisi del profilo e l'analisi delle forze di taglio. Tutto questo ha contribuito a chiarire le meccaniche di formazione dei difetti, ad ampliare i parametri utilizzabili per classificarli visualmente, ed a spiegare le dinamiche e le qualità attese lavorando a diversi angoli della fibratura.

Un breve stato dell'arte per ogni tematica affrontata sarà proposto all'inizio di ogni capitolo. Per l'analisi visuale sarà presentato lo standard ASTM-1966-89 alla base di questo tipo di esame. Per l'analisi dei profili si farà un breve presentazione dei parametri fino ad ora utilizzati e per le forze di taglio si procederà ad una breve analisi dei dati raccolti in passato. Per gli aspetti generali relativi ai difetti e per le meccaniche di taglio non si faranno preamboli perché ampiamente trascurati fino ad oggi dalla ricerca scientifica sul legno, ad eccezione della scomposizione delle forze e di altre informazioni di base tratti dall'esperienza acquisita nella lavorazione dei metalli.

Si tratta di un contributo innovativo che al tempo stesso tiene conto sia delle tecnologie di lavorazione sia delle caratteristiche del materiale, e che associa all'analisi tecnica quella anatomica, per una nuova interpretazione unitaria delle lavorazioni del legno, affrontate dal duplice punto di vista (biologico e meccanico al tempo stesso) della Scienza del Legno e della Meccanica

Introduction

Cette recherche propose une analyse mécanique de la formation et de la qualité des surfaces du bois usiné par outil tournant. D'une façon plus spécifique nous examinerons les relations entre la géométrie de coupe et la qualité obtenue. Les résultats d'un usinage dans le sens du fil et en contre-fil sont très bien connus d'un point de vue empirique par les praticiens du bois, mais jusqu'à maintenant et à notre connaissance une description objective des phénomènes n'avait jamais été réellement tentée. Cette recherche essaye de fournir une explication générale sur l'origine des surfaces et de leurs défauts et à classifier les différents phénomènes mécaniques de formation. Ce thème devient de plus en plus important avec la généralisation des machines à CN et l'introduction de techniques comme l'usinage 5 axes permettant d'obtenir des formes complexes et où le sens du fil dans l'usinage devient un problème très important par rapport à la qualité final. La recherche s'est articulée en plusieurs phases. Avant de conduire des essais systématiques, nous avons passé une longue période à nous familiariser avec les machines, avec les défauts et les réactions du bois à l'usinage, à étudier la terminologie nécessaire pour décrire les phénomènes et à faire le choix des meilleurs paramètres d'usinage (vitesse d'avance, vitesse de rotation, engagement axial). Après cette phase préliminaire, nous avons commencé les tests systématiques sur trois essences avec trois structures anatomiques assez différents (douglas, chêne et hêtre), usinant avec différents angles du fil, dans le sens du fil, en contre-fil, en avalant et en opposition. Avec ces configurations, nous avons provoqué la formation quasi exhaustive des différents défauts possibles et nous les avons analysés en utilisant plusieurs techniques : macro photographie, microscopie optique, microscopie électronique, analyse des profils, efforts de coupe. L'ensemble des analyses a contribué à fournir des réponses importantes sur le comportement du bois pendant la coupe, pour une nouvelle interprétation bio-mécanique de l'usinage du bois.

Capitolo 1

Generalità sulle lavorazioni del legno

1.1 Introduzione

Questo lavoro è probabilmente utile per coloro che sono già in possesso dei concetti di base legati alle lavorazioni del legno. Ciononostante per favorire i lettori meno esperti in questo capitolo si cercherà di riportare, anche se in maniera molto breve, i concetti fondamentali delle lavorazioni in generale e delle lavorazioni del legno in particolare.

1.2 Tipi di lavorazione

Le lavorazioni si distinguono in: “lavorazioni per penetrazione”, tra cui spaccatura, tranciatura, sfogliatura e “lavorazioni per asportazione di truciolo”, a cui appartengono segagione, piallatura, foratura e fresatura. Le lavorazioni per asportazioni di truciolo vengono distinte in due grandi gruppi, detti rispettivamente, di prima e seconda lavorazione, a seconda che questa avvenga prevalentemente su materiale grezzo o su materiale già parzialmente lavorato. Le prime lavorazioni sono generalmente applicate ai tronchi per ottenere parallelepipedi retti a sezione trasversale quadrata, rettangolare o trapezia detti nel loro complesso “segati”. Le seconde lavorazioni vengono eseguite su elementi già parzialmente lavorati e più o meno stagionati. Le lavorazioni risentono di più fattori, intrinseci o estrinseci alla lavorazione stessa. Intrinseci al materiale (estrinseci alla lavorazione quindi) sono le sue caratteristiche meccaniche, la sua umidità. Intrinseci alla lavorazione sono le caratteristiche dei ferri taglienti, le velocità di lavorazione e l’orientazione della fibratura. Le lavorazioni in relazione alla direzione anatomica in cui la lavorazione avviene sono state divise da McKenzie in: $90^\circ-0^\circ$, $90^\circ-90^\circ$, $0^\circ-90^\circ$. Il primo numero individua l’angolo tra il filo tagliente e la direzione della fibratura, mentre il secondo identifica l’angolo tra la direzione di avanzamento e la direzione della fibratura. Fanno parte delle lavorazioni $90^\circ-0^\circ$ la tranciatura nel senso della lunghezza del tronco, la segagione per il lungo con sega circolare, la scanalatura per il lungo con seghe a nastro, la piallatura e la fresatura per il lungo. Fa parte delle lavorazioni $90^\circ-90^\circ$ la

segagione per il lungo, e delle lavorazioni 0° – 90° la sfogliatura, la tranciatura di fianco e la troncatura. A questi casi estremi bisogna aggiungere che variando l'angolo della fibratura si possono creare numerose situazioni intermedie la cui analisi è alla base di questo lavoro. Inoltre a seconda che il moto di avanzo del pezzo sia concorde o discorde con il moto dell'utensile, le lavorazioni possono essere divise in lavorazioni eseguite in discordanza e lavorazioni eseguite in concordanza. Queste due categorie saranno analizzate in maniera più approfondita in seguito.

1.3 Materiali usati nelle lavorazioni

I materiali usati nelle lavorazione del legno o dei prodotti derivati sono molteplici: acciaio, acciaio rapido, stellite, carburo di tungsteno, diamante. Ognuno di questi materiali è più o meno adatto a differenti tipi di lavorazione e di prodotti a lavorare. Per le lavorazioni con utensile rotante del legno massello (quelle cioè che ci interessano più da vicino ai fini di questo lavoro) i materiali maggiormente usati sono l'acciaio rapido, il carburo di tungsteno e il diamante. L'acciaio rapido ha vita relativamente breve rispetto agli altri due materiali, ma costa relativamente poco e può essere riaffilato facilmente. Inoltre a causa della sua duttilità può essere facilmente affilato con angoli di becco piccoli, fattore che lo rende importante nelle lavorazioni di conifere e nella sfogliatura. Il carburo di tungsteno è molto più resistente dell'acciaio rapido, ma anche molto più fragile. Questo obbliga ad avere angoli di becco più grandi e quindi una peggiore qualità lavorando legni teneri. Il diamante per la sua grande fragilità obbliga ad avere angoli di becco molto grandi e quindi può essere utilizzato soltanto per le lavorazioni di materiali derivati dal legno. Tutte le lavorazioni eseguite nei capitoli a seguire sono state eseguite con placchette in carburo di tungsteno intercambiabili, perché è il supporto maggiormente usato.

1.4 Lavorazioni discordi e concordi

Queste due lavorazioni sono assai differenti l'una dall'altra e comportano differenti meccaniche di formazione delle superfici. Le caratteristiche di ognuna di queste lavorazioni e le differenze tra di esse saranno messe in evidenza nelle parti a seguire.

1.4.1 Lavorazioni in discordanza

Lavorare in discordanza vuole dire che i due moti relativi, di taglio e di avanzamento, sono in direzione opposta. Questo comporta che la formazione del truciolo inizi dalla parte di minore spessore per concludersi nella parte di spessore massimo, che la traiettoria dell'utensile durante il taglio sia ascendente e che il moto di taglio sia diretto nella direzione in cui la superficie è già stata lavorata.

1.4.2 Lavorazioni in concordanza

Lavorare in discordanza vuole dire che i due moti relativi, di taglio e di avanzamento, sono nella stessa direzione. Questo comporta che la formazione del truciolo inizi dalla parte di massimo spessore, per concludersi nella parte di spessore minimo, che la traiettoria dell'utensile durante il taglio sia discendente e che il moto di taglio sia diretto nella direzione in cui la superficie deve ancora essere lavorata.

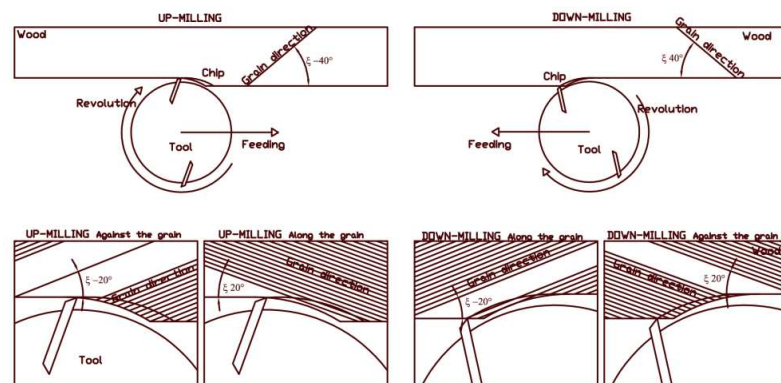


Figura 1.1: Schema riassuntivo delle lavorazioni eseguite nel senso del filo o controfilo, rispettivamente lavorando in concordanza, o in discordanza — Schéma d'usinage dans le sens du fil et contre fil, en opposition et en avalant. [Goli]

1.5 Lavorazioni ed angolo della fibratura

1.5.1 Lavorazioni eseguite a filo dritto

Si definisce *lavorazione a filo dritto* quella lavorazione in cui la direzione della fibratura formi un angolo di 90° con la retta congiungente il centro dell'utensile e il becco tagliente nel punto di tangenza con la superficie.

1.5.2 Lavorazioni eseguite nel senso del filo

Si definisce *lavorazione nel senso del filo* quella lavorazione in cui la direzione della fibratura formi un angolo maggiore di 0° ed inferiore a 90° con la retta congiungente il centro dell'utensile e il becco tagliente nel punto di tangenza con la superficie

1.5.3 Lavorazioni eseguite controfilo

Si definisce *lavorazione controfilo* quella lavorazione in cui la direzione della fibratura formi un angolo maggiore di 90° ed inferiore a 180° con la retta congiungente il centro dell'utensile e il becco tagliente nel punto di tangenza con la superficie

1.5.4 Lavorazioni eseguite in testa

Si definisce *lavorazione di testa* quella lavorazione in cui la direzione della fibratura formi un angolo di 0° con la retta congiungente il centro dell'utensile e il becco tagliente nel punto di tangenza con la superficie.

1.6 Materiali e metodi

Al fine di analizzare il comportamento del legno lavorando con differenti angoli della fibratura si è provveduto ad eseguire una serie di prove preliminari per decidere la metodologia da attuare. Le considerazioni presenti nei primi capitoli derivano direttamente da questa esperienza, che rappresenta circa due mesi di lavoro in cui si è familiarizzato con i difetti. Molte prove sono state effettuate in questo periodo, con differenti profondità di taglio, a differenti velocità di avanzo, con differenti angoli della fibratura. Le metodologie utilizzate nelle lavorazioni a differenti angoli della fibratura saranno invece analizzate nei capitoli dedicati.

Généralisées sur l'usinage du bois

Types d'usinage

Par définition, l'usinage du bois se fait par enlèvement de matière. On considère alors deux configurations principales :

- *le copeau est le produit fini (tranchage, déroulage)*
- *le copeau est éliminé (fraisage, tournage, ...)*

L'usinage intervient tant en première qu'en deuxième transformation. Dans le premier cas, on vise à produire du matériel de forme régulière, et dans le second, on travaille du matériau sec et déjà usiné pour obtenir les formes et côtes définitives. Les différents usinages ont été classifiés par McKenzie en utilisant deux numéros : le premier représente l'angle entre l'arête de coupe et le fil du bois, le deuxième l'angle entre la direction d'avance du bois et le fil du bois même. En coupe orthogonale donc, on distingue principalement trois modes de coupe :

- *la coupe $90^\circ-0^\circ$ (tranchage en longueur, fraisage longitudinal, ...),*
- *la coupe $90^\circ-90^\circ$ (fraisage en bout, sciage de délignage, ...),*
- *la coupe $0^\circ-90^\circ$ (déroulage, sciage de tronçonnage).*

L'usinage peut aussi être classifié comme en avalant si l'entraînement du morceau de bois est dans la même direction de la coupe et en opposition si les deux mouvements sont de directions opposées.

Matériaux utilisées dans l'usinage du bois

Les matériaux usinants les plus utilisés sont l'acier rapide (HSS), les carbures de tungstène, les diamants polycristallins. L'acier rapide est beaucoup moins dur que les autres matériaux mais moins fragile, d'où des angles de bec beaucoup plus faibles. Avec les carbures de tungstène, matériau fritté donc fragile, l'angle de bec est plus grand et la qualité de l'arête plus faible, mais la durée de vie des outils est nettement améliorée. Ce matériau est donc très utilisé. Les diamants polycristallins accentuant encore les avantages et inconvénients mis en évidence

avec les carbures de tungstène, ils sont mis en oeuvre en ménageant un angle de bec tellement grand que ces outils ne peuvent parfois pas être adapté à l'usinage du bois massif.

Usinage en opposition et en avalant

Ces deux types d'usinages sont assez différents et la réponse mécanique des surfaces est tout à fait différent.

Usinage en opposition

On dit que l'on usine en opposition si l'entraînement du morceau de bois se fait dans la direction opposée de celle de coupe. La formation du copeau commence par la partie plus mince, pour terminer avec son épaisseur maximale, et la trajectoire du couteau pendant la coupe est ascendant.

Usinage en avalant

On dit que l'on usine en avalant si l'entraînement du morceau de bois se fait dans la même direction que celle de coupe. La formation du copeau commence de la partie plus épaisse, pour terminer avec son épaisseur minimale, et la trajectoire du couteau pendant la coupe est descendant.

Usinages et angle du fil

En se référant à la direction du fil du bois et au plan d'usinage on peut classifier 4 types d'usinage:

- *Usinage en droit fil: on usine en droit fil lorsque la direction du fil du bois fait un angle de 90° avec la ligne qui relie le centre de l'outil et le point de tangence de l'outil avec la surface*
- *Usinage dans le sens du fil: on usine dans le sens du fil si la direction du fil du bois fait un angle compris entre 0° et 90° avec la ligne qui relie le centre de l'outil et le point de tangence de l'outil avec la surface*
- *Usinage à contre-fil: on usine à contre-fil si la direction du fil du bois fait un angle compris entre 90° et 180° avec la ligne qui relie le centre de l'outil et le point de tangence de l'outil avec la surface*
- *Usinage de bout: on usine en droit fil si la direction du fil du bois fait un angle de 0° avec la ligne qui relie le centre de l'outil et le point de tangence de l'outil avec la surface.*

Capitolo 2

Generalità su irregolarità e difetti

Sommario: Al fine di discutere approfonditamente i problemi riguardanti le finiture superficiali è necessario fornire definizioni precise, e dividere in maniera netta quelle reazioni che possono essere definite come difetti di lavorazione da quelle che non possono essere definite tali. Ogni lavorazione ha come conseguenza una riorganizzazione della superficie. La percettibilità del disordine causato dalla riorganizzazione della superficie dopo il taglio diventa la linea di demarcazione tra assenza di difetto, irregolarità appena percettibili e difetti di lavorazione.

2.1 Introduzione

Questo lavoro fa parte di una più ampia ricerca riguardante la qualità finale delle superfici lavorate e le loro meccaniche di formazione. Tale ricerca concerne lavorazioni di finitura eseguite a vari angoli della fibratura rispetto al piano di lavorazione, nel senso del filo e controfilo lavorando in concordanza ed in discordanza. Le superfici lavorate sono state sottoposte a diversi tipi di analisi: analisi delle forze di taglio, analisi del profilo, analisi macroscopica e microscopica, analisi delle meccaniche di formazione ed analisi dei trucioli ottenuti nella lavorazione. Questi aspetti caratterizzanti le superfici saranno presi in esame singolarmente. Lo scopo di questa pubblicazione è quello di fare chiarezza in campo terminologico dando le opportune definizioni degli stati delle superfici lavorate.

2.2 Irregolarità

Il problema che ci poniamo in questo capitolo è la definizione e l'analisi di quelle che sono le irregolarità delle superfici lavorate.

Si definisce *irregolarità* di una superficie una qualsiasi difformità dal profilo delimitato della “superficie teorica”.

Per rendere chiara questa definizione deve dunque essere esplicitato il concetto di ‘superficie teorica’:

Si definisce *superficie teorica* la superficie descritta dal margine tagliente di un utensile durante il taglio.

Tale superficie non deve necessariamente essere piana, ma può essere anche di forma complessa, e le irregolarità su di essa presenti possono essere distinte a seconda che siano derivanti direttamente dalla struttura anatomica del materiale o dall’interazione tra questa e il tagliente durante la lavorazione. Le irregolarità si dividono quindi in:

- Irregolarità anatomiche
- Irregolarità di lavorazione

La scala su cui misurare l’importanza di queste ‘irregolarità’ dovrà anzitutto essere calibrata. È importante infatti riferirsi ad entità quantificabili utilizzando una scala di misura. In questo caso l’organo principalmente deputato alla loro quantificazione è l’occhio umano, e su di esso deve quindi essere eseguita la calibrazione della scala di misura. Qualsiasi superficie risulterà infatti irregolare se osservata per mezzo di strumenti di ingrandimento. Fattore essenziale per poter analizzare le irregolarità risulta quindi essere la demarcazione di una frontiera oltre la quale le “irregolarità” rilevate risultino essere importanti. Tali irregolarità, in base alla loro visibilità si dividono quindi in:

- irregolarità chiaramente visibili
- irregolarità appena percettibili
- irregolarità non percettibili

Tra le irregolarità trattate quelle che maggiormente ci interessano sono quelle, conseguenti la lavorazione, che danno luogo a “difetti”, cioè le irregolarità di lavorazione che siano chiaramente visibili. Le altre rappresentano stati delle superfici che generalmente non presentano problemi qualitativi importanti.

2.2.1 Irregolarità anatomiche

Queste irregolarità dipendono direttamente dalla struttura anatomica del pezzo, e la loro origine non è legata alla lavorazione effettuata. Rientrano quindi nel gruppo degli aspetti estetico-anatomici definiti in par. 2.4, in quanto particolarità caratterizzanti una specie. La loro dimensione è quindi secondaria per quanto riguarda la determinazione della qualità della superficie, perché facenti parti delle caratteristiche stesse della specie da cui l’aspetto finale della superficie lavorata non può prescindere. Le “irregolarità anatomiche” possono essere di varie dimensioni: si pensi ai vasi nella quercia (ben visibili ad occhio nudo) o alle fibrotracheidi nella douglasia (visibili soltanto per mezzo di sistemi di ingrandimento). Le più importanti e visibili sono rappresentate da:

- vasi grandi

- canali resiniferi

I vasi grandi spesso rimangono ben visibili sulla superficie una volta eseguita la lavorazione, allo stesso modo dei canali resiniferi. Questi sono esempi chiaramente visibili di “pura anatomia” (vedi Fig. 2.1). Alle “irregolarità anatomiche appena percettibili” e “non percettibili” appartengono tutti gli elementi anatomici meno netti o visibili soltanto ad alto ed altissimo ingrandimento che, vista la loro scarsa influenza sulla qualità della superficie finale, non saranno presi in considerazione in questa trattazione.

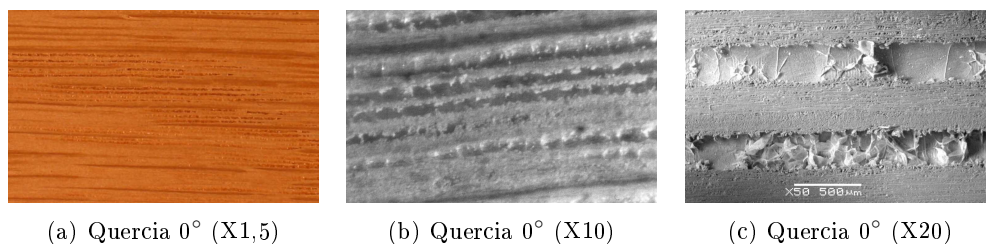


Figura 2.1: Vasi grandi su un campione di quercia lavorato a filo dritto (0°); ripreso a basso ingrandimento (a), a medio ingrandimento (b) e ad elevato ingrandimento (c). — Gros vaisseaux dans un échantillon de chêne usiné en droit fil (0°) à grossissement faible (a), moyen (b) et grand (c). [Foto Goli]

2.2.2 Irregolarità di lavorazione

Le irregolarità di lavorazione invece non dipendono esclusivamente dal materiale, come le precedenti, ma direttamente dall'interazione tra questo e l'utensile. Il fatto che siano chiaramente visibili, appena percettibili o non percettibili conferisce loro dunque un'importanza molto diversa. Le “irregolarità chiaramente visibili” rappresentano i “difetti di lavorazione”, quelle “appena percettibili” lo stato di transizione tra “difetto” e “assenza di difetto”, e quelle “non percettibili” ad occhio nudo determinano l’“assenza di difetto”.

Irregolarità di lavorazione chiaramente visibili

Le irregolarità di lavorazione che l'occhio umano può chiaramente osservare sono quelle che maggiormente ci interessano sia perché chiaramente visibili, sia perché derivanti da un processo che non ha come scopo la loro formazione. Tali irregolarità costituiscono il gruppo dei “difetti di lavorazione” (vedi Fig. 2.2). Per la loro importanza fondamentale nell'ambito della qualità delle superfici lavorate saranno approfonditamente trattate in par. 2.3.

Irregolarità di lavorazione appena percettibili

Tali ‘irregolarità’, pur rappresentando uno scostamento dalla superficie teorica, come i ‘difetti di lavorazione’, si distinguono da essi in quanto detto scostamento non è distintamente visibile ad occhio nudo (ad occhio nudo è appena percettibile), ma osservabile chiaramente soltanto tramite un sistema di ingrandimento. Le fondamentali manifestazioni di tale fenomeno sono:

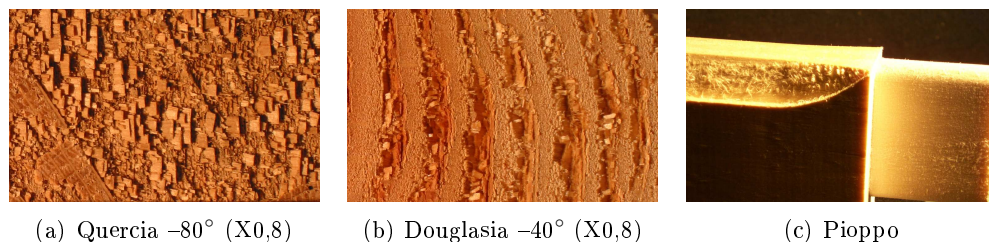


Figura 2.2: ‘Irregolarità di lavorazione’ chiaramente visibili, riprese a medio ingrandimento su quercia e douglasia, e a basso ingrandimento su un elemento profilato di pioppo. Il numero indica l’inclinazione della fibratura ed il ‘-’ davanti indica che la lavorazione è stata eseguita controfilo. — Irrégularités visibles d’usinage reprises à grossissement moyen sur du chêne (a), du douglas (b), et à bas grossissement sur une pièce de peuplier. Le numéro donne l’angle du fil par rapport au plan d’usinage, le signe ‘-’ indique un usinage à contre-fil. [Foto Goli]

- effetto lucido
- effetto opaco

L’*“effetto lucido”* e l’*“effetto opaco”* rappresentano la frontiera tra difetto e non difetto. Sono la manifestazione di meccaniche che se fossero più intense porterebbero all’origine di difetti, ma che, per via della loro scarsa intensità, risultano in fenomeni appena percettibili ad occhio nudo. L’effetto lucido deriva da una compressione trasversale delle fibre che caratterizza le lavorazioni eseguite nel senso del filo, mentre l’effetto opaco si forma per sollevamento delle stesse e loro successiva compressione sulla superficie in direzione opposta a quella iniziale (vedi Fig. 2.3).

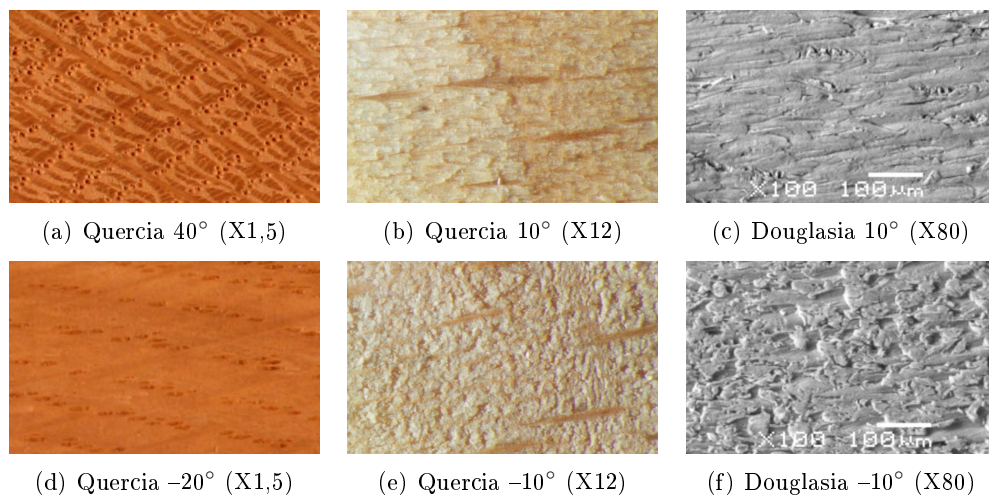


Figura 2.3: Effetto lucido (a,b,c) ed effetto opaco (d,e,f) su quercia e douglasia; ripreso a basso ingrandimento (a,d), a medio ingrandimento (b,e) e ad elevato ingrandimento (c,f). — Effet brillant (a,b,c) et effet mat (d,e,f) dans le chêne et le douglas à grossissements faibles (a,d), moyens (b,e) et grands (c,f). [Foto Goli]

Irregolarità di lavorazione non percettibili

Piccole imprecisioni di taglio di singoli elementi non percettibili ad occhio nudo rappresentano comunque un lascito della lavorazione. Tali irregolarità anche se derivanti dalla lavorazione, sono di secondaria importanza, ed in quanto non visibili non possono essere considerate difetti di lavorazione (vedi Fig. 2.4). Questo aspetto delle lavorazioni fa parte della situazione descritta come “assenza di difetti” che sarà analizzata assieme alle “particolarità estetico anatomiche” in par. 2.4.

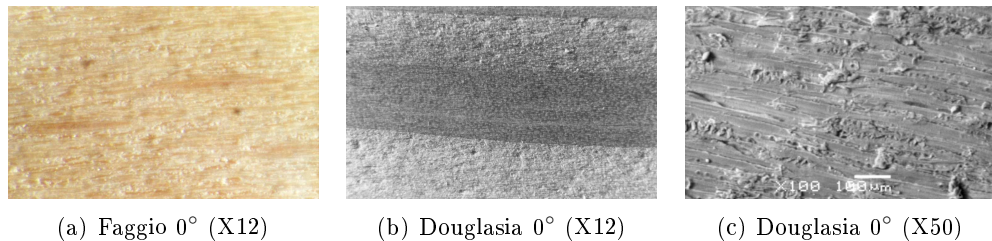


Figura 2.4: Irregolarità di lavorazione non percettibili rilevate su faggio e douglasia; riprese a medio (a,b) e ad elevato ingrandimento (c) — Irrégularités d’usinage non perceptibles sur du hêtre et du chêne à grossissement moyen (a,b) et grand (c). [Foto Goli]

2.3 Difetti di lavorazione

Per descrivere adeguatamente i difetti che si manifestano sulle superfici a seguito di lavorazione di finitura per mezzo di utensile rotante è necessario anzitutto riportare quella che in lingua italiana è la definizione di difetto:

Difetto è mancata compiutezza, sufficienza o efficienza di qualcosa, mancanza, carenza, scarsità. Elemento concreto che diminuisca il pregio di un oggetto [5].

In questa definizione potenzialmente possono rientrare molte delle caratteristiche del legno, tra cui anche alcuni fattori anatomici o estetici se indesiderati. Quello che per noi è realmente importante è una famiglia della grande classe dei difetti del legno, che sono i “difetti di lavorazione”.

Si definiscono *difetti di lavorazione* tutti gli scostamenti da una superficie teorica, direttamente derivanti dalla lavorazione, chiaramente distinguibili dall’occhio umano e che non siano pura struttura anatomica.

In altre parole utilizzando le definizioni date nel paragrafo precedente:

Si definiscono *difetti di lavorazione* le “irregolarità di lavorazione chiaramente visibili ad occhio nudo”.

I “difetti di lavorazione” possono essere sistematizzati secondo due linee interpretative fondamentali:

- Interpretazione “qualitativa”
- Interpretazione “meccanica”

L’interpretazione qualitativa determina differenti difetti in base al loro aspetto e per ognuno di essi differenti gradi di intensità, mentre l’interpretazione meccanica tenta di dare un’interpretazione di tipo meccanico ai diversi stati delle superfici, analizzando le modalità di interazione tra utensile e fibratura.

I difetti possono inoltre essere distinti secondo alcuni principi generali ed astratti in:

- Evitabili e inevitabili
- Gradabili e non gradabili
- Diffusi e specifici

Lo scopo di queste distinzioni non è quello di creare una ulteriore classificazione, ma di disporre di altri ausili per poterli descrivere in maniera più completa.

Difetti evitabili e inevitabili: è molto difficile definire l’evitabile e l’inevitabile nei confronti di un problema relativo. In generale si può affermare che un difetto debba essere considerato inevitabile se dopo una lavorazione eseguita allo stato dell’arte e alle condizioni intrinseche del pezzo il difetto si manifesti ugualmente. I difetti ‘evitabili’ sono in generale causati da errori o incompetenza da parte dell’operatore nell’impostazione dei parametri di lavorazione (rotazioni per minuto dell’utensile, scelta di un avanzo per dente sbagliato, etc.). I difetti ‘inevitabili’ sono generalmente legati alle caratteristiche del materiale (ad esempio, la variazione della qualità finale in funzione della direzione della fibratura se si deve fresare un cerchio nel legno massello).

Difetti gradabili e non gradabili: questa importante distinzione si basa sul grado di intensità dei difetti. Quando per una stessa tipologia di difetto sono riconoscibili diversi gradi di intensità il difetto si dice allora ‘gradabile’ (lo standard ASTM D1666-1987 per la classificazione visuale definisce ad esempio diversi difetti e per ognuno di essi 5 gradi di intensità). Difetti per cui non è possibile fare distinzioni di intensità sono da considerarsi ‘non gradabili’. Per tali difetti ci si limita quindi a rilevarne la presenza o l’assenza su una superficie.

Difetti diffusi e specifici: alcuni difetti possono essere definiti ‘diffusi’, perché interessano diffusamente più specie o più condizioni di lavoro, e altri ‘specifici’, perché si presentano esclusivamente per certe specie o lavorando in determinate condizioni.

2.4 Assenza di difetti ed aspetti estetico-anatomici

La scelta di definire l’“assenza di difetti” dopo aver definito i difetti può sembrare strana o insensata, ma è necessaria per determinarne la “non presenza”.

L'*assenza di difetti* nelle lavorazioni di finitura superficiale, come visto nella definizione data in par. 2.3, è caratterizzata dall'assenza di irregolarità di lavorazione distintamente visibili ad occhio nudo sulla superficie lavorata. Non è detto che tali irregolarità non siano presenti: semplicemente non sono visibili oppure sono “appena percettibili” oppure se sono visibili sono pura struttura anatomica.

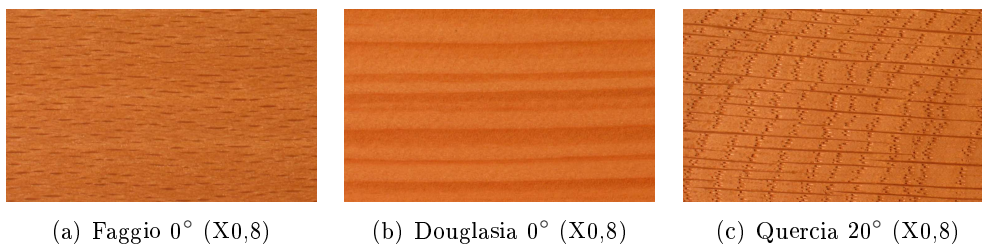


Figura 2.5: ‘Assenza di difetti’ ed ‘aspetti estetico-anatomici’ ripresi a basso ingrandimento — Absence de défaut. Aspects esthetico-anatomiques à faible grossissement. [Foto Goli]

Le superfici senza difetti possono comunque presentare diversità estetiche legate a diversità di tipo anatomico. Si definiscono quindi “*aspetti estetico-anatomici*” quegli aspetti dipendenti da fattori anatomici che creano particolarità estetiche anziché irregolarità superficiali. Sono importanti perché da essi dipende l’aspetto che la superficie verrà ad assumere una volta eseguita la lavorazione. Di seguito se ne elencano i principali:

- aspetti da variazione di densità: la differente densità tra legno primaverile ed estivo è fonte di grande diversità estetica tra le specie
- aspetti da sezione lavorata: la sezione lavorata influisce sul disegno finale del legno (effetto fiammato, rigato etc.)
- aspetti da raggi parenchimatici: nelle specie in cui esistono, essi conferiscono un diverso aspetto alle superfici (“slumacature” nella quercia e “marezzature” nell’acero)
- aspetti da variazione di colore: si pensi alla differenza tra alborno e durame

Tali aspetti possono potenzialmente rappresentare un “difetto” nel momento in cui risultino indesiderati, ma non potranno mai rappresentare un “difetto di lavorazione” (vedi Fig. 2.5).

Irrégularités et défauts

Irrégularités

Pour décrire les surfaces il faut avant tout définir la nomenclature nécessaire pour parler des phénomènes qui les caractérisent. Le problème principal des surfaces est que une fois créées par usinage, elles peuvent présenter des irrégularités inattendues qui perturbent la forme. On définit donc une irrégularité comme étant un écart par rapport à la surface attendue. Les irrégularités mêmes peuvent être classifiées suivant leur origine en:

- *irrégularités anatomiques;*
- *irrégularités d'usinage.*

Les irrégularités anatomiques sont des écarts dus à l'anatomie du bois, donc aux caractéristiques du bois même. Les irrégularités d'usinage trouvent leur origine dans l'interaction entre les propriétés anatomiques du matériaux et le processus de coupe. Une fois définies, les irrégularités doivent être mesurées. Le sens habituellement utilisé dans leur appréciation est l'œil humain. Il faut donc établir des domaines qui définissent l'importance des irrégularités. Par rapport à l'œil humain, les irrégularités peuvent être:

- *visibles*
- *à peine perceptibles*
- *non perceptibles*

Irrégularités anatomiques

L'origine de ces irrégularités est liée exclusivement aux caractéristiques anatomiques du bois. Les plus importantes et visibles sont:

- *les gros vaisseaux*
- *les canaux résinifères*

Le fait qu'elles soient bien visibles ou non faisant partie des caractéristiques intrinsèques du bois, il n'y a pas lieu ici de faire le distinguo.

Irrégularités d'usinage

Concernant les irrégularités d'usinage, le fait qu'elles soient visibles ou non est important à considérer, de part leur origine due au processus de coupe.

Visibles - Les irrégularités d'usinage "visibles" sont à la base du groupe des "défauts d'usinage".

A peine perceptibles - L'écart de la surface attendue n'est pas trop important. Ces irrégularités ont pour origine les mêmes causes mécaniques que les irrégularités visibles, causes intervenant cependant plus faiblement. La surface est assez régulière mais en considérant la réflexion de la lumière on classe deux phénomènes:

- *effet brillant*
- *effet mat*

Non perceptibles- Il existera toujours des irrégularités dans les surfaces usinées si on les observe sous grossissement. Ces irrégularités ne sont pas importantes quant à leurs conséquences au niveau de la qualité des surfaces.

Défauts d'usinage

On définit les défauts d'usinage comme étant l'ensemble des écarts à une surface attendue, conséquences directes de l'usinage, perceptibles à l'œil nu et indépendant de la structure anatomique. Les défauts peuvent être interprétés:

- *qualitativement*
- *sur le plan mécanique*

Le premier type d'interprétation classe les familles de défauts et leur intensité, le deuxième proposant une interprétation mécanique de l'origine du défaut. Les défauts peuvent aussi être classifiés comme:

- *évitables ou inévitables. Les défauts évitables en générale ont pour origine des erreurs d'usinage et les inévitables sont plutôt liés à des limites du processus ou aux caractéristiques du bois;*
- *classables ou inclassables. Les défauts classables sont ceux qui peuvent être ventilés parmi plusieurs classes d'intensité contrairement aux inclassables (classement binaire).*
- *répandus ou spécifiques. Les défauts répandues intéressent plusieurs essences et processus d'usinage. Les défauts spécifiques concernent des situations particulières.*

Absence de défauts et aspects esthetico-anatomiques

Une fois les défauts d'usinage définis, tout ce qui n'a pas été classé comme défaut d'usinage peut être classé dans la catégorie "absence de défauts". Les surfaces sans défaut peuvent présenter des aspects esthetico-anatomiques différents qui peuvent être appréciés ou pas. Les motifs observés peuvent être dus

- *aux variations de densité*
- *à l'orientation de la surface usinée*
- *aux rayons ligneux*
- *aux variations de couleur*

qui ne seront jamais des défauts d'usinage.

Capitolo 3

Classificazione qualitativa dei difetti con metodo visuale

Sommario: Nella parte precedentemente trattata riguardante le “Generalità su irregolarità e difetti”, si sono illustrate le definizioni fondamentali per poter discutere in maniera più approfondita dell’argomento. In questo capitolo riguardante esclusivamente i “difetti di lavorazione” si segue la logica dell’“interpretazione qualitativa”, si procederà infatti all’analisi delle superfici in senso “visuale”. La norma più usata per questo tipo di classificazione è una norma dello standard americano ASTM ed in particolare la D1666-87. Tale norma sarà di seguito discussa e si forniranno proposte di integrazione per delle parti in cui si è rivelata insufficiente.

3.1 Introduzione

Questo lavoro fa parte di una più ampia ricerca riguardante la qualità finale delle superfici lavorate e le loro meccaniche di formazione. Tale ricerca concerne lavorazioni di finitura eseguite a vari angoli della fibratura rispetto al piano di lavorazione, nel senso del filo e controfilo, lavorando in concordanza ed in discordanza. Le superfici lavorate sono state sottoposte a diversi tipi di analisi: analisi delle forze di taglio, analisi del profilo, analisi macroscopica e microscopica, analisi delle meccaniche di formazione ed analisi dei trucioli ottenuti nella lavorazione. Questi aspetti caratterizzanti le superfici saranno presi in esame singolarmente. Questa pubblicazione, oltre a presentare un metodo per la classificazione visuale mira a presentare in maniera approfondita tutti i difetti fondamentali che si formano eseguendo una lavorazione di finitura con utensile rotante su legno massello. Per interpretare la superficie si possono usare molteplici criteri: criteri così detti soggettivi, che spesso si basano sui sensi umani ed in particolare la vista (metodo visuale), o criteri così detti oggettivi, che cioè rilevano direttamente lo stato della superficie (analisi dei profili) o che ne interpretano lo stato a partire da grandezze fisiche ad esso più o meno correlate (metodo a pressione o a depressione). Si procederà all’analisi generale dei difetti e quindi all’analisi del metodo visuale.

3.2 Classificazione qualitativa dei difetti

Lo scopo generale con cui generalmente si esegue l'analisi dei "difetti di lavorazione" è quello di determinare la qualità di una superficie lavorata con un determinato processo, al fine di poterle assegnare un "grado di finitura". Ma spesso tale analisi può essere utilizzata anche per determinare la lavorabilità di una determinata specie. Questi aspetti della classificazione sono stati già normalizzati da molto tempo, in particolare dalla norma ASTM D-1666-87 [1] che fornisce un'ampia descrizione su come preparare i provini ed effettuare le lavorazioni ed un chiaro e ben strutturato sistema di riferimenti fotografici per la classificazione visuale comparata. Qui di seguito si presenterà brevemente il sopracitato standard ASTM che, per l'efficacia e la semplicità di uso, è uno dei più validi ausili alla classificazione qualitativa delle superfici lavorate. Nonostante questo, anche tale standard risulta essere incompleto. Lo scopo di questa pubblicazione è quello di analizzarlo approfonditamente e fornirne le necessarie integrazioni. Questa classificazione, che si limita ad un approccio qualitativo visuale, sarà successivamente integrata dalle meccaniche generali di formazione delle superfici e dall'interpretazione dei difetti alla luce di queste per ottenere un approccio completo alla formazione delle superfici.

3.3 Lo standard ASTM D-1666-87

Iniziamo questa trattazione descrivendo in generale i principi della norma ASTM D-1666-87. Tale norma individua per le principali lavorazioni del legno le caratteristiche dei provini, il loro numero minimo necessario per l'esecuzione di una prova, i parametri di lavorazione, i criteri di classificazione, i formulari per la raccolta dati e le modalità di analisi statistica dei dati. La norma riguarda molti tipi di lavorazione (piallatura, scartatura, foratura, fresatura, mortasatura, tornitura) eseguite sia sul legno massello che sui prodotti derivati dal legno. Si fa riferimento ad essa al fine di utilizzare una scala standard per la descrizione dei difetti. Come vedremo, questa classificazione si è rivelata incompleta sotto alcuni aspetti, e quindi dove non si è potuto ricorrere ai difetti standardizzati ne abbiamo definiti di nuovi. I quattro difetti fondamentali individuati dalla norma e da essa descritti in senso qualitativo e quantitativo sono di seguito elencati¹:

- Raised grain (Fibra rialzata)
- Fuzzy grain (Fibra lanuginosa)
- Torn grain (Fibra strappata)
- Chip marks (Segni di trucioli)

Per ognuno di questi difetti la norma prevede cinque differenti gradi di intensità:

- grade 1, excellent (ottimo)

¹Le traduzioni in italiano sono riprese da [25].

- grade 2, good (buono)
- grade 3, fair (medio)
- grade 4, poor (mediocre)
- grade 5, very poor (basso)

Il “grado 1” rappresenta l’assenza di difetto, quindi l’ottenimento di una superficie definibile eccellente. Il “grado 2”, il “grado 3” ed il “grado 4” sono definiti da fotografie di riferimento e rappresentano diversi gradi di gravità del difetto in ordine crescente. Il “grado 5” contiene tutti i difetti classificabili come più gravi del “grado 4”, e non ha quindi bisogno di riferimento fotografico. I singoli difetti saranno esaminati approfonditamente in seguito assieme alle proposte di integrazione allo standard.

3.4 Integrazioni e revisioni allo standard

Nell’esecuzione delle lavorazioni spesso si sono incontrati ulteriori difetti non aderenti ai riferimenti fotografici dello standard ASTM D-1666-87. Si è rivelata dunque necessaria un’integrazione ed una revisione dello standard. Il fatto che questi difetti presentassero caratteristiche diverse ha reso necessaria una loro differenziazione:

- Difetti principali: sono classificabili come “diffusi”² e soprattutto “gradabili”³. Tra questi rientrano i difetti classicamente definiti con l’aggiunta di altri due difetti: “Fibra schiacciata” e “Fibra embriciata”. I difetti principali risultano quindi essere:
 - Raised grain (Fibra rialzata)
 - Fuzzy grain (Fibra lanuginosa)
 - Torn grain (Fibra strappata)
 - Chip marks (Segni di trucioli)
 - Pressed grain (Fibra schiacciata)
 - Tilted grain (Fibra embriciata)
- Difetti minori: tali difetti sono meno presenti e diffusi dei precedenti, e sono, in quanto minori; “specifici” e “non gradabili”. Ne fanno parte:
 - Legno primaverile sporgente
 - Vasi uncinati
 - Raggi infossati

²Che riguardano cioè più specie e situazioni di lavoro (in contrapposizione ai difetti “specifici” che riguardano casi isolati)

³Nei quali possono essere riscontrati diversi gradi di intensità (in contrapposizione ai “non gradabili” di cui ci si limita a rilevarne la presenza o l’assenza su una superficie senza poter attribuire un grado di intensità)

Nell'esecuzione delle lavorazioni, infatti, spesso si è incorsi in difetti di secondaria importanza non classificati e difficilmente gradabili. Questa divisione è stata studiata col fine di poter riportare anche tali difetti all'interno di questa trattazione generale, anche se niente impedisce di non considerarli al momento dell'esecuzione di prove di lavorazione.

3.4.1 Difetti principali

I difetti principali sono quei difetti classificabili come 'diffusi' e 'gradabili'. Di essi fanno parte i quattro tipi fondamentali di difetti individuati e classificati dalla norma ASTM D-1666-87 [1] con l'aggiunta della "Fibra schiacciata" e della "Fibra embriciata".

- Raised grain (Fibra rialzata)

È una condizione di irregolarità della superficie lavorata in cui il legno estivo, compatto e resistente, viene spinto sopra il legno primaverile, che essendo incoerente e spugnoso vi rimane schiacciato sotto (Fig. 3.1).

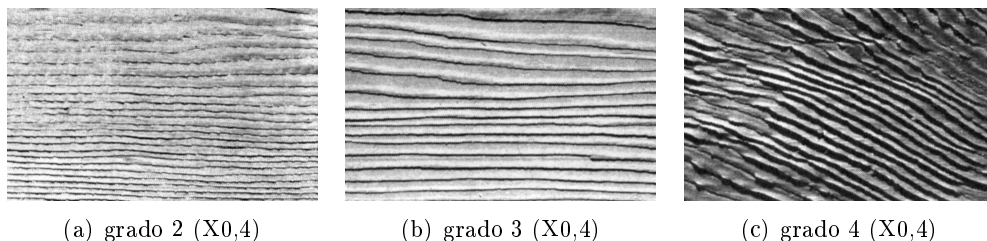


Figura 3.1: Classificazione della 'Fibra rialzata' come da standard ASTM D-1666-87 — Classification des "Fibres soulevées" selon la norme ASTM D1666-87. (Le immagini sono tratte direttamente dalla norma)

- Fuzzy grain (Fibra lanuginosa)

Sono gruppi di elementi, parzialmente strappati e sollevati dall'utensile durante la lavorazione, di cui un'estremità rimane ancorata sulla superficie lavorata, mentre l'altra rimane libera di muoversi sopra il piano di lavorazione (Fig. 3.2).

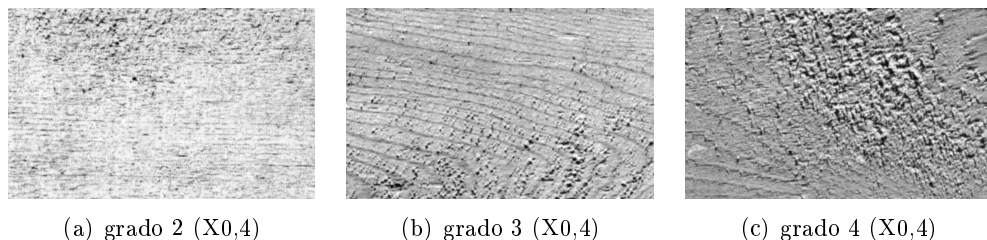


Figura 3.2: Classificazione della 'Fibra lanuginosa' come da standard ASTM D-1666-87 — Classification des "Surfaces pelucheuses" selon la norme ASTM D1666-87. (Le immagini sono tratte direttamente dalla norma)

- Torn grain (Fibra strappata)

Sono gruppi di elementi che vengono strappati sotto la ‘superficie teorica’ anziché essere tagliati durante la lavorazione, lasciando così un infossamento sulla superficie (Fig. 3.3).

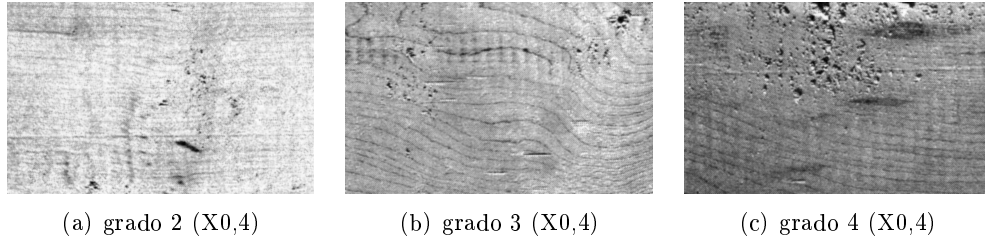


Figura 3.3: Classificazione della ‘Fibra strappata’ come da standard ASTM D-1666-87 — Classification des “Fibres arrachées” selon la norme ASTM D1666-87. (Le immagini sono tratte direttamente dalla norma)

- Chip marks (Segni di trucioli)

Sono impronte sulla superficie lavorata dovute a particelle di legno che rimangono attaccate al coltello a seguito del taglio anziché essere espulse o che si trovano nella traiettoria del coltello a causa di una cattiva aspirazione e che si frappongono tra utensile e superficie, impedendo una lavorazione corretta (Fig. 3.4).

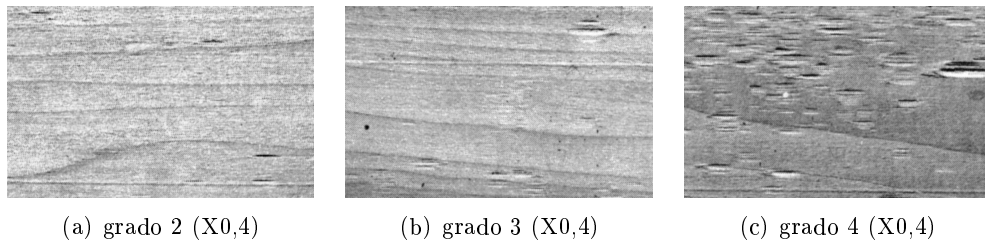


Figura 3.4: Classificazione dei ‘Segni di trucioli’ come da standard ASTM D-1666-87 — Classification des “Marques de copeaux” selon la norme ASTM D1666-87. (Le immagini sono tratte direttamente dalla norma)

- Pressed grain (Fibra schiacciata)⁴

Ai difetti definiti dalla norma ASTM era già stato aggiunto in altre pubblicazioni un ulteriore difetto chiamato “*Pressed grain*” (*Fibra schiacciata*) [12, 24]. Tale difetto si origina per sollevamento degli elementi cellulari nella lavorazione controfilo. Dopo essere stati sollevati gli elementi vengono rigirati e plasticamente compressi sulla superficie al passaggio del coltello. Questo comporta la

⁴Questo difetto, inizialmente battezzato “fibra rigirata” [24], viene qui rinominato “fibra schiacciata”.

formazione di superfici molto irregolari e sgradevoli al tatto, perché gli elementi sono rigidamente compressi sulla superficie. Tale difetto, poiché deriva da una compressione plastica delle fibre, prende il nome di ‘Fibra schiacciata’. Si riporta in Fig. 3.5 la rappresentazione fotografica del difetto per i gradi 2, 3, 4, al fine di poter applicare la classificazione se necessario. A titolo di esempio si riporta inoltre quello che può essere considerato un grado 5.

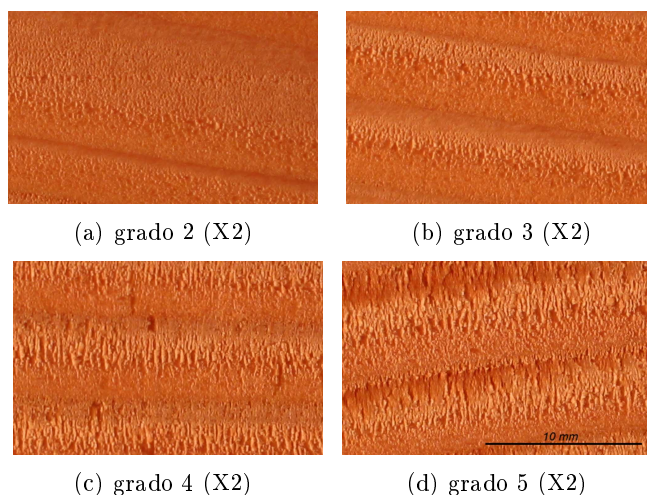


Figura 3.5: Classificazione della ‘Fibra schiacciata’ nei 3 gradi previsti dallo standard ASTM D-1666-87; al fine di mostrarne una descrizione completa se ne riporta anche un grado 5 — Classification des ‘Fibres comprimées’ suivant les 3 degrés prévus par la norme. [Foto Goli].

- Tilted grain (Fibra embriciata)

L’esecuzione delle prove ci ha inoltre condotto all’individuazione di un ulteriore difetto, probabilmente trascurato precedentemente perché si verifica esclusivamente lavorando in concordanza. La tecnologia di lavoro in concordanza ha un ruolo secondario nella lavorazione del legno massello a causa dei mezzi necessari per eseguirla (macchine sicure ed automatiche) e perché per questa lavorazione sul legno massello si ottiene generalmente una qualità inferiore a quella ottenibile lavorando in discordanza. Forse per questa ragione era stata trascurata al momento della stesura della norma. Questo nuovo difetto è stato battezzato “Fibra embriciata” [12, 13]. Tale denominazione deriva dal fatto che tutte le “lamelle” sollevate sono rigirate e poste una sopra l’altra a formare una struttura simile a quella degli embrici dei tetti. Si riporta in Fig. 3.6 un riferimento fotografico completo di questo difetto. Per le manifestazioni di bassa intensità, le lamelle anziché essere incombenti sulla superficie sono strappate via, ma la distribuzione scalare degli strappi indica comunque che siamo in corrispondenza di questo tipo di difetto. Come legge generale si può sostenere che se stiamo lavorando in concordanza il problema delle fibre strappate è sostituito da quello dalle fibre embriciate.

Come già detto, questa classificazione ha lo scopo fondamentale di permettere una valutazione della qualità finale conseguente un certo processo di la-

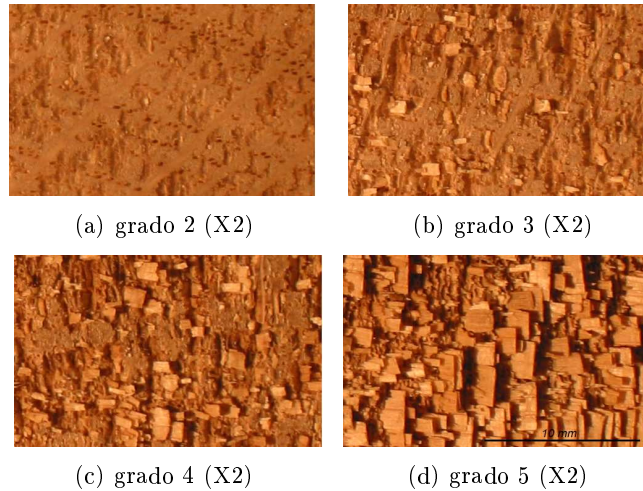


Figura 3.6: Classificazione della ‘Fibra embriciata’ nei 3 gradi previsti dallo standard ASTM D-1666-87; al fine di mostrarne una descrizione completa se ne riporta anche un grado 5 — Classification des ‘Fibres retournées’ suivant les 3 degrés prévus par la norme. [Foto Goli]

vorazione, oppure di poter valutare la lavorabilità di una specie a prescindere dalle ragioni per cui questi difetti si formino. Lo standard ASTM D1666-87 rimane tutt’oggi preziosissimo per la qualificazione delle superfici lavorate; semplice, chiaro, di facile applicazione e dai criteri abbastanza oggettivi. Standard che suggeriamo di utilizzare nei casi prima descritti, con l’aggiunta della “Fibra schiacciata” per ogni tipo di lavorazione e della “Fibra embriciata” per quanto riguarda le superfici lavorate in concordanza. In Tab. 3.1 si riporta una lista completa dei difetti principali e delle loro traduzioni.

3.4.2 Difetti minori

Oltre ai difetti principali si sono definiti difetti di secondaria importanza, così detti “minori”, che per definizione devono essere “specifici” e “non gradabili” (vedi par. 3.4). Questa classificazione risponde quindi alla necessità di descrivere difetti che si formano in condizioni particolari e che oltre tutto non presentano variazioni di intensità; se ne rileva semplicemente l’esistenza o meno su una superficie lavorata. Ne fanno parte tre tipi di difetti:

- legno primaverile sporgente
- vasi uncinati
- raggi infossati

Si fa di seguito una descrizione approfondita di questi difetti e se ne fornisce una completa documentazione fotografica (vedi Fig. 3.7).

Legno primaverile sporgente: la differente densità tra legno primaverile ed estivo causa una differente reazione dei due tipi di legno durante la lavorazione. In particolare, la differente capacità di assorbimento dello shock

dei due tipi di legno porta ad un differente ritorno elastico. Da un punto di vista qualitativo la superficie non è percepita come di bassa qualità. Si osserva semplicemente che il legno primaverile ed il legno estivo giacciono su due piani differenti, aderendo così alla definizione di “difetto di lavorazione”⁵. Questo comportamento è tanto più evidente quanto maggiore è la capacità del legno di reagire in maniera elastica. Si nota comunque che tale difetto non oltrepassa mai certi limiti e quindi non si può definire come ‘gradabile’. Inoltre, riguarda esclusivamente le specie in cui ci sia grande differenza tra legno primaverile ed estivo, e quindi casi ‘specifici’ di lavorazione.

Vasi uncinati: tipico delle latifoglie a vasi grandi, si verifica lavorando nel senso del filo per basse inclinazioni della fibratura sia in discordanza che in concordanza. In questa situazione, durante il taglio, poiché il coltello esercita una compressione degli elementi, che tendono a resistere al taglio, il bordo del vaso viene spinto all’interno del lume del vaso stesso, tornando sporgente⁶ dopo il passaggio del coltello. Questa parte sporgente, posizionandosi al di sopra del piano di lavorazione, rappresenta un importante elemento di disturbo tattile, anche se il disturbo visuale è limitato.

Raggi infossati: tipico delle specie provviste di raggi, è da non confondersi con gli “aspetti da raggi parenchimatici” che fanno parte degli “aspetti estetico-anatomici” e che quindi non sono classificabili come difetti. Il problema dei ‘raggi infossati’, è la diversa orientazione delle fibre che reagiscono in maniera diversa rispetto agli altri elementi cellulari, risultando su due piani diversi una volta eseguita la lavorazione. Questo comportamento, poco visibile ad occhio nudo, è messo in evidenza con l’uso di una luce radente.

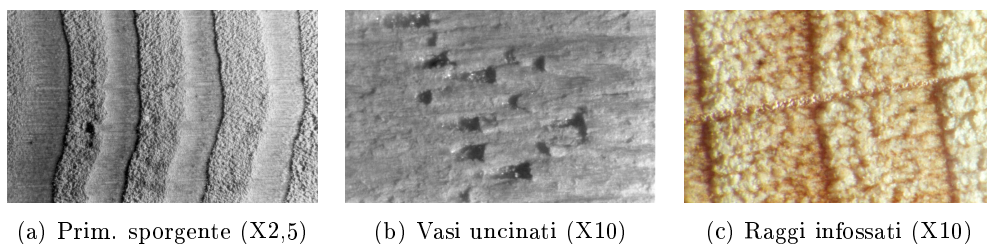


Figura 3.7: Classificazione dei difetti minori, ripresi a medio (legno primaverile sporgente) e ad elevato ingrandimento (raggi infossati, vasi uncinati). Tali difetti, essendo ‘non gradabili’ non prevedono la divisione in gradi di intensità — Classification des défauts secondaires “Bois de printemps proéminent” (a), “Vaisseaux rappeurs” (b), Rayons enfoncés (c). [Foto Goli]

In tab. 3.3 si riporta una lista completa di difetti minori con la loro rispettiva traduzione.

⁵Tutti gli scostamenti da una superficie teorica, direttamente derivanti dalla lavorazione, chiaramente distinguibili dall’occhio umano e che non siano pura struttura anatomica

⁶Per ‘sporgente’ si intende ‘al di sopra della superficie teorica’.

Difetto	Defect	Défaut
Fibra rialzata	Raised grain	Fibres soulevées
Fibra lanuginosa	Fuzzy grain	Surfaces pelucheuses
Torn grain	Fibra strappata	Fibres arrachées
Segni di trucioli	Chip marks	Marques de copeaux
Fibra schiacciata	Pressed grain	Fibres comprimées
Fibra embriciata	Tilted grain	Fibres retournées

Tabella 3.1: Specchio riassuntivo multilingue dello standard ASTM D1666-87 per la classificazione visuale e suo ampliamento per quanto riguarda i difetti “principali” — Tableau multi-langue des “défauts principaux” (Principal defects)

	Grado	Grade	Degrée
1	ottimo	excellent	excellent
2	buono	good	bon
3	medio	fair	moyen
4	mediocre	poor	médiocre
5	basso	very poor	mauvais

Tabella 3.2: Specchio riassuntivo multilingue dei gradi previsti dallo standard ASTM D1666-87 — Tableau des degrés prévu par le standard ASTM D1666-87.

Difetto	Defect	Défauts
Legno primaverile sporgente	Leaning early-wood	Bois de printemps proéminent
Vasi uncinati	Hooked-vessels	Vaisseaux crochetés
Raggi infossati	Hollow rays	Rayons ligneux enfoncés

Tabella 3.3: Specchio riassuntivo multilingue dei difetti “minori” — Tableau multi-langue des “défauts secondaires” (Minor defects)

Classification qualitative des défauts

La norme ASTM-D1666-87

La norme ASTM-D1666-87 définit des méthodes standards pour l'évaluation visuelle de la qualité des surfaces usinées. Cette norme concerne plusieurs types d'usinage et de matériaux bois massifs ou dérivés. Nous l'utiliserons pour évaluer le résultat d'une opération de fraisage sur du bois massif. La norme définit plusieurs défauts:

- *les fibres soulevées*
- *les surfaces pelucheuses*
- *les fibres arrachées*
- *les marques de copeaux*

qui peuvent avoir des degrés d'intensité différents:

- *1: excellent*
- *2: bon*
- *3: moyen*
- *4: médiocre*
- *5: mauvais*

Intégrations et adaptation de la norme

La norme même si elle est assez complète s'est montrée insuffisante pour décrire tous les défauts que l'on avait à classifier. Pour cette raison

- *de nouveaux défauts ont été introduits*
- *nous avons divisé les défauts en principaux ou secondaires.*

Les défauts principaux sont classables et répandus. Deux nouveaux défauts ont été introduits:

- *les fibres comprimées*
- *les fibres retournées.*

La liste complète des défaut principaux devient donc la suivante:

- *Fibres soulevées*
- *Surfaces pelucheuses*
- *Fibres arrachées*
- *Marques de copeaux*
- *Fibres comprimées*
- *Fibres retournées*

Les défauts secondaires sont non classables et spécifiques. Ils sont indiqués dans la liste suivante:

- *Bois de printemps proéminent*
- *Vaisseaux crochétés*
- *Rayons ligneux enfoncés*

Capitolo 4

Meccaniche di formazione delle superfici

Sommario: La ricerca per lungo tempo si è dedicata allo studio di molti aspetti delle superfici (rugosità o energia superficiale) tralasciando aspetti fondamentali come le meccaniche di formazione dei difetti. Nella trattazione che segue si cercherà di definire le sollecitazioni imposte alle superfici durante il taglio e le loro risposte in senso meccanico.

4.1 Introduzione

Lo studio delle superfici ha fino ad oggi mirato alla determinazione della qualità finale di una superficie lavorata, con lo scopo di poterle assegnare un “grado di finitura”. Un aspetto che è stato fino ad ora trascurato è invece quello dell’origine meccanica del difetto. Come vedremo, tale origine può essere sempre ricondotta sia alle variabili intrinseche ed estrinseche alla lavorazione, sia in particolar modo all’angolo della fibratura rispetto al piano di taglio. Si sono quindi studiate le basi meccaniche di interazione legno-utensile, che dovranno poi essere analizzate alla luce del loro risultato in senso visuale. Questo approccio alle superfici prescinde dalla gravità estetica derivante dall’interazione meccanica, e quindi non tratta la qualità di una superficie lavorata, ma ha semplicemente lo scopo di comprendere quali meccaniche siano alla base della formazione delle superfici.

4.2 Sollecitazioni e loro sviluppi

Tutti i difetti traggono la loro origine da una difficoltà del tagliente nell’eseguire il taglio. Per approfondire dunque le conseguenze legate ad un taglio difficoltoso deve essere anzitutto definita l’operazione di ‘taglio’ del legno da parte di un utensile.

L’azione del *tagliare* il legno consiste nella separazione della materia secondo la superficie descritta dal margine tagliente di un utensile e nella deflessione del materiale separato [7].

Nel nostro caso questa incapacità a tagliare è legata solo in parte alle caratteristiche dell'utensile, ma principalmente alle caratteristiche intrinseche del legno. Il legno è un materiale anisotropo, le cui caratteristiche meccaniche variano nei diversi piani. Gli elementi cellulari sono connessi da forze di vario tipo ed intensità, legami covalenti in direzione longitudinale e legami secondari sul piano trasversale. Questo comporta la formazione di piani con differenti caratteristiche meccaniche. Ogni tagliente, non essendo perfettamente affilato, esegue una pressione sugli elementi cellulari. A seguito di queste sollecitazioni gli elementi cellulari offrono una *resistenza al taglio*¹ che cambia al variare dell'angolo della fibratura.

Si definisce *resistenza al taglio* la resistenza offerta dagli elementi cellulari interessati all'azione meccanica del tagliente durante il taglio².

Tale resistenza quindi è strettamente dipendente dall'orientazione degli elementi ed è quindi uno dei principali fattori che determinano l'evoluzione della superficie sottoposta a lavorazione. Il modo con cui evolverà poi la superficie durante il taglio a causa della resistenza che oppone al tagliente prende il nome di *modalità di scissione* e dipenderà come vedremo dall'interazione tra l'appena definita 'resistenza al taglio' e la 'reazione massima' sostenibile dalle caratteristiche meccaniche della specie nella direzione sollecitata. Mentre la 'resistenza al taglio' riguarda i singoli elementi cellulari e la loro disposizione nello spazio e quindi la tendenza del singolo elemento ad essere tagliato, la 'reazione' nel suo complesso riguarda invece gruppi di elementi cellulari ed il loro comportamento meccanico. Per un approfondimento sulle forze di taglio si veda l'"Appendice B".

4.3 Modalità di scissione

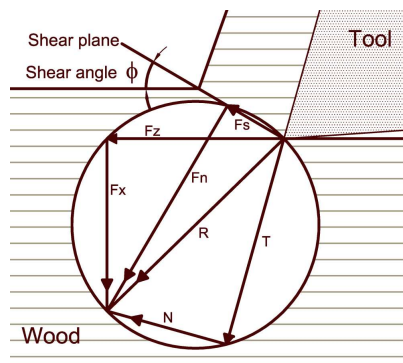
I singoli elementi rispondono alle sollecitazioni opponendo una resistenza meccanica che abbiamo già definito 'resistenza al taglio', la superficie nel suo complesso risponde alle sollecitazioni con una 'reazione al taglio'. L'evoluzione della superficie ed in particolare la sua reazione a queste sollecitazioni saranno strettamente dipendenti dal rapporto tra la 'resistenza al taglio' e le caratteristiche meccaniche del pezzo in lavorazione. Quindi, a seconda che la superficie reagisca alla sollecitazione provocando un taglio preciso e netto o che si abbiano cedimenti strutturali, si hanno due tipi fondamentali di scissione:

- scissione per taglio
- scissione con cedimento

che saranno prese in considerazione in maniera più approfondita in seguito (vedi Fig. 4.2).

¹Da non confondere con la *resistenza a taglio* che è meccanicamente la resistenza offerta ad una sollecitazione 'a taglio' o con il *rifiuto al taglio* che è la tendenza del legno a sfuggire al taglio quando si cerca di tagliare trucioli di spessore esiguo.

²Da non confondere con la *'reazione al taglio'*, che invece è la reazione meccanica del legno in lavorazione



(a) Cerchio delle forze

Figura 4.1: Il cerchio delle forze di Ernst e Merchant mostra l'insieme delle sollecitazioni eseguendo il taglio con moto rettilineo. La reazione offerta al taglio è rappresentata da $-R$ da scomporre in $-F_s$ e $-F_n$. N : forza normale alla faccia dell'utensile, T : forza di attrito truciolo-utensile R : risultante, F_s : forza di scorrimento, F_n : forza normale al piano di scorrimento, F_z : forza principale, F_x : resistenza all'avanzamento. Shear angle: angolo di scorrimento, Shear plane: piano di scorrimento — Cercle des forces de Ernst et Merchant. [Schema Goli]

(a) Per Taglio 0° (X2)(b) Con cedimento -40° (X2)

Figura 4.2: ‘Scissione per taglio’ e ‘scissione con cedimento’ su legno di Douglasia equilibrato all'11% di umidità — “Séparation par cisaillement” et “séparation par endommagement” dans du douglas à $H = 11\%$. [Foto Goli]

4.3.1 Scissione per taglio e “superficie teorica”

Il fatto che la scissione avvenga ‘per taglio’, cioè secondo la definizione fornita in par. 4.2, fa sì che gli elementi cellulari sottostanti il coltello siano separati dai soprastanti per “sollecitazione a taglio”. Questo comportamento implica che gli elementi cellulari siano capaci di *autosostenersi* durante il passaggio dell'utensile per permettere un taglio preciso e netto. Il taglio in queste condizioni si svilupperà lungo la superficie descritta dal margine tagliente (almeno in prossimità della superficie, come vedremo nel concetto di “zona di pertinenza” in par. 4.4). Il fatto che le resistenze meccaniche del pezzo in lavorazione siano maggiori della ‘resistenza al taglio’ fa sì che non si abbiano cedimenti strutturali, e le reazioni conseguenti prendono quindi il nome di ‘reazioni con taglio’.

Si definisce *scissione per taglio* quella separazione di materia in cui la ‘resistenza al taglio’ risulti inferiore alla resistenza meccanica del materiale stesso (reazione massima) nella direzione in cui avviene

la sollecitazione, e quindi la scissione avvenga in maniera precisa e netta lungo la linea percorsa dal margine tagliente.

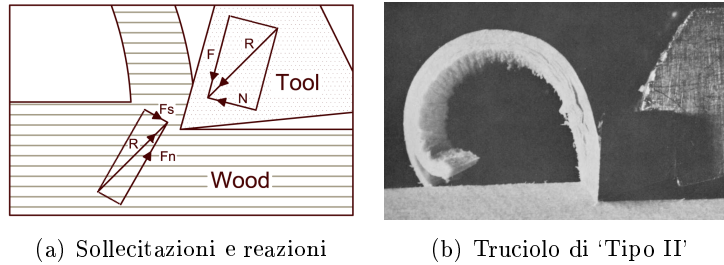


Figura 4.3: “Scissione per taglio”, producente un truciolo di tipo II. Schema riportante sollecitazioni e reazioni durante il taglio (a) [Schema Goli]. Foto di una lavorazione producente un truciolo di ‘Tipo II’ tra quelli descritti da Franz, implicante cioè una ‘scissione per taglio’ (b) — Séparation par cisaillement avec un copeau de type II. Schéma des sollicitations et réactions pendant la coupe (a). Copeau de type II (b). [Foto Woodson and Koch].

La scissione avviene per taglio prevalente, perché la sollecitazione a taglio è la più importante in questo caso, anche se ciò non esclude la presenza di altre sollecitazioni. Di solito si verifica con la formazione di un truciolo di “Tipo II” (vedi Fig. 4.3) tra quelli descritti da Franz [6]. Per soddisfare questa condizione non è necessaria una particolare orientazione della fibratura; certo è comunque che, essendo il legno più resistente in senso longitudinale ed essendo il piano di debolezza del legno orientato longitudinalmente, per le specie a densità medio-bassa è più facile rientrare in questa condizione eseguendo una lavorazione a filo dritto o con angoli relativamente bassi della fibratura, mentre le specie ad alta densità spesso hanno caratteristiche meccaniche tali da permettere una lavorazione corretta anche lavorando ad angoli alti della fibratura o addirittura eseguendo una lavorazione di testa. La superficie ottenuta con questa modalità di scissione è la più prossima alla così detta ‘superficie teorica’.

Si definisce *superficie teorica*: quella superficie descritta dalla combinazione del moto dell’utensile e del moto di avanzamento del pezzo durante una lavorazione.

Tale superficie rappresenta il riferimento a cui comparare le superfici ottenute per lavorazione.

4.3.2 Scissione con cedimento

La scissione con cedimento è invece caratterizzata da cedimenti strutturali dovuti al fatto che la ‘resistenza al taglio’ è più importante delle caratteristiche meccaniche del materiale stesso (vedi Fig. 4.4). Questa resistenza quindi innescava meccanismi che provocano cedimenti strutturali delle fibre anziché un taglio preciso e netto.

Si definisce *scissione con cedimento* quella separazione di materia in cui la ‘resistenza al taglio’ risulti maggiore della resistenza meccanica

del materiale stesso (reazione massima) nella direzione in cui avviene la sollecitazione, e quindi la scissione avvenga su una linea diversa da quella percorsa dal margine tagliente.

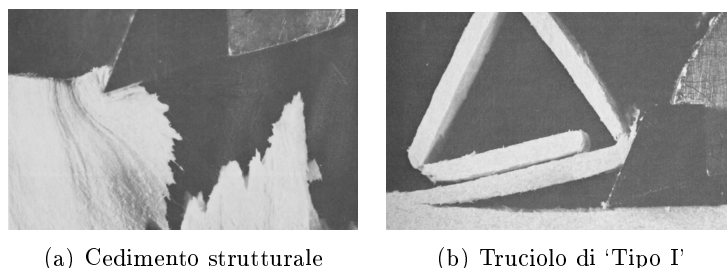


Figura 4.4: ‘Scissioni con cedimento’, causate da diverse meccaniche come la compressione in (a), e la formazione di trucioli di ‘Tipo I’ [Franz] in (b) — Séparation par endommagement par compression (a), et formation de copeau de type I (b). [Foto Woodson and Koch].

Questa situazione si verifica principalmente quando gli elementi cellulari sono inclinati rispetto alla tangente tra utensile e superficie finale, ed è imputabile alle mediocri caratteristiche meccaniche del legno in sezione trasversale ed alla forte resistenza dello stesso ad una sollecitazione impressa in questa direzione. Il taglio sui piani sub-longitudinale, sub-trasversale o trasversale risulta quindi essere un’operazione assai più complessa rispetto al taglio eseguito in direzione longitudinale. Queste sollecitazioni portano il materiale a rompersi per cedimenti strutturali, e generalmente sono alla base dei così detti “difetti di lavorazione”.

Tale ‘modalità di scissione’ può originarsi da due tipi di reazioni fondamentali:

- reazione a trazione trasversale
- reazione a compressione trasversale

che sono riconducibili alle lavorazioni che causano una tendenza alla compressione della materia in lavorazione o un sollevamento della stessa. Tali reazioni riguardano quindi principalmente le lavorazioni eseguite “nel senso del filo” (per schiacciamento) e “controfilo” (per sollevamento). Anche in questo caso la trazione e la compressione devono essere intese come ‘prevalenti’, perché non escludono la presenza di altre sollecitazioni, anche se sono sicuramente le più importanti.

Reazione a trazione trasversale

Si verifica quando, a seguito della sollecitazione impressa dal coltello agli elementi cellulari durante il taglio, gruppi di questi tendono ad essere sollevati. Questo avviene a causa dell’inclinazione degli elementi cellulari che, quando spinti in avanti, tendono a ruotare verso l’alto rispetto ad un fulcro generalmente posizionato sotto la superficie teorica, ma può avvenire anche per una

lavorazione eseguita a filo dritto nel caso della formazione di trucioli di tipo I. La tendenza al sollevamento degli elementi cellulari provoca, tra gli elementi in sollevamento e quelli sottostanti, una reazione meccanica di trazione trasversale (vedi Fig. 4.5). Tale reazione è attribuibile in termini generali alle lavorazioni eseguite “controfilo”:

Si definisce *lavorazione controfilo* quella lavorazione in cui la direzione della fibratura formi un angolo maggiore di 90° ed inferiore a 180° con la retta congiungente il centro dell’utensile e il becco tagliente nel punto di tangenza con la superficie.

In certi casi tale reazione si attribuisce anche alle lavorazioni eseguite “a filo dritto” (trucioli del “Tipo I” [6]), che generalmente sono invece legata ad una “reazione con taglio”:

Si definisce *lavorazione a filo dritto* quella lavorazione in cui la direzione della fibratura formi un angolo di 90° con la retta congiungente il centro dell’utensile e il becco tagliente nel punto di tangenza con la superficie.

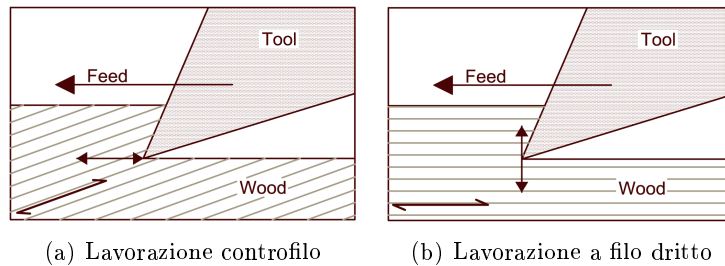


Figura 4.5: Schemi delle lavorazioni con reazione a trazione trasversale eseguite “controfilo” (a) e “a filo dritto” (b) e delle sollecitazioni conseguenti — Schéma d’usinage avec réaction en traction transversale usinant à contre-fil (a) et en droit fil (b). [Schema Goli].

Reazione a compressione trasversale

Tale reazione si verifica quando, a seguito della sollecitazione impressa dal coltello agli elementi cellulari durante il taglio, gruppi di questi tendono ad essere compressi sulla superficie (vedi Fig. 6). Tale reazione è attribuibile in termini generali alle lavorazioni eseguite “nel senso del filo”:

Si definisce *lavorazione nel senso del filo* quella lavorazione in cui la direzione della fibratura formi un angolo maggiore di 0° ed inferiore a 90° con la retta congiungente il centro dell’utensile e il becco tagliente nel punto di tangenza con la superficie

e alla “lavorazione di testa”:

Si definisce *lavorazione di testa* quella lavorazione in cui la direzione della fibratura formi un angolo di 0° con la retta congiungente il centro dell'utensile e il becco tagliente nel punto di tangenza con la superficie.

In queste due lavorazioni gli elementi cellulari, a causa della notevole resistenza offerta al taglio durante l'avanzamento dell'utensile, anziché essere tagliati tendono ad essere compressi sugli elementi seguenti per cedimento del lume cellulare.

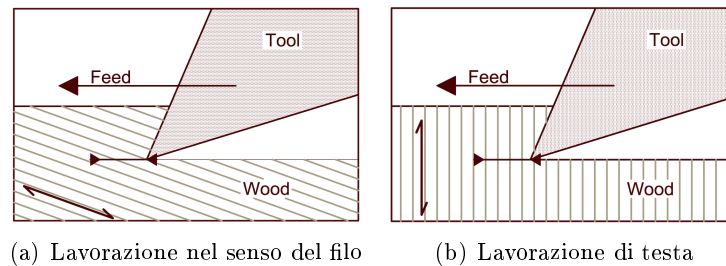


Figura 4.6: Schemi delle lavorazioni con reazione a compressione trasversale eseguite “nel senso del filo” (a) e “di testa” (b) e delle sollecitazioni conseguenti — Schéma d’usinage avec réaction en compression usinant dans le sens du fil (a) et en bout (b). [Schema Goli].

4.4 “Zone di pertinenza” e “Serie meccaniche”

Fattori importanti come la zona di origine della superficie e l'interazione dinamica tra utensile ed elementi cellulari trovano una loro parziale rappresentazione nei concetti di “zona di pertinenza” (Fig. 4.7 e 4.8) e di “serie meccanica” (Fig. 4.9).

Si definisce *zona di pertinenza* quella zona che per le condizioni di lavoro impostate ha un'influenza meccanica o estetica sulla qualità finale della superficie lavorata.

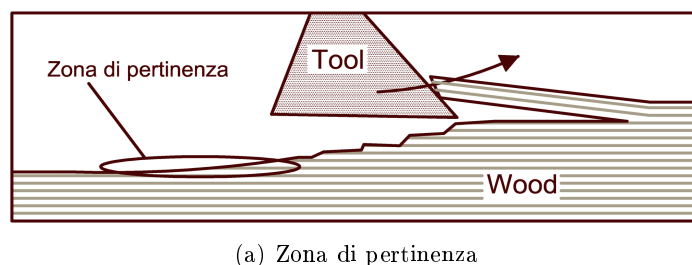


Figura 4.7: Si noti come le rotture nella parte alta (per trazione trasversale e flessione) non influenzino lo stato della superficie e quindi non facciano parte della così detta ‘zona di pertinenza’ — Zone fonctionnelle : les fractures ne représentent pas un problème pour la qualité de la surface usinée. [Schema Goli]

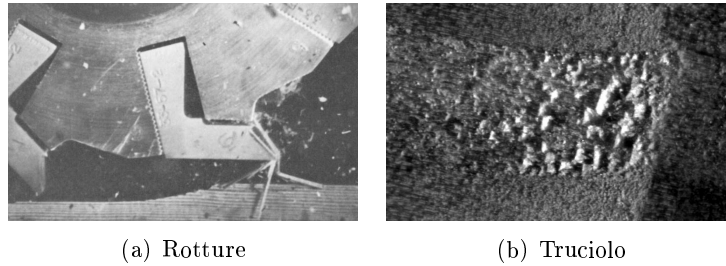


Figura 4.8: Si noti come in (a) le rotture nella parte alta non abbiano la minima influenza sulla qualità superficiale [Foto Koch]. In (b) si ha invece una superficie in cui si è interrotta la lavorazione, anche qui si noti come i difetti presenti nella parte alta dell’arco di cerchio percorso dalla lama non siano presenti sulla superficie — Zone fonctionnelle : ce qui apparaît en haut ne représente pas un problème pour la qualité de la surface usinée. [Foto Goli].

Le sollecitazioni che si susseguono in questa zona sono da considerarsi all’origine della superficie finale e fanno parte della così detta “serie meccanica”.

Si definisce “*serie meccanica*” quell’insieme di sollecitazioni meccaniche in successione che interessano una certa zona di pertinenza e che hanno come conseguenza un determinato stato di una superficie

Questo significa che la formazione di una superficie per asportazione di truciolo deriva da un insieme di sollecitazioni meccaniche che si susseguono in un certo intervallo di tempo in una certa zona. Questa evoluzione di meccaniche prende il nome di “serie meccanica” e la zona le cui meccaniche interessano la superficie in formazione prende il nome di “zona di pertinenza”. La serie meccanica identifica univocamente la meccanica di formazione ed è alla base della classificazione delle meccaniche di formazione.

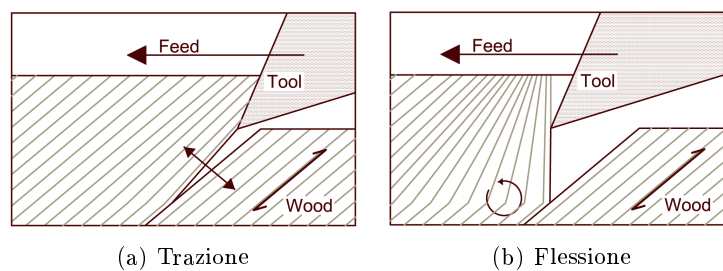


Figura 4.9: Schematizzazione del concetto di “Serie meccanica”. Si noti come il difetto si origini con una meccanica per “reazione a trazione” e poi la rottura avvenga per flessione — Schéma du concept de “succession mécanique”. Origine du défaut en traction transversale et évolution par une rupture en flexion. [Schema Goli]

Meccaniche che si verificano durante il taglio ma che non interessino la superficie, perché ad esempio si sta lavorando uno spessore elevato, non fanno parte della “serie meccanica”. Fanno invece parte della serie meccanica le differenze intrinseche tra le lavorazioni eseguite in discordanza ed in concordanza. Come sappiamo queste lavorazioni differiscono profondamente l’una dall’altra.

La lavorazione in discordanza inizia il taglio nel punto di tangenza con la superficie finale e dalla parte di minimo spessore del truciolo, continuando il taglio con moto ascendente. La lavorazione in concordanza inizia il taglio dalla parte di massimo spessore del truciolo e lo conclude con moto discendente nel punto di tangenza con la superficie finale. Questa è un’indubbia e non trascurabile differenza di tipo meccanico tra i due processi. Un fattore importante per l’interpretazione di questi fenomeni è la “zona di pertinenza”. Dove la “zona di pertinenza” sia ravvicinata al punto di tangenza possiamo dire che l’evoluzione meccanica dei due tipi di lavorazione sia molto simile a parità di inclinazione della fibratura, e quindi si possono considerare come facenti parte della stessa “serie meccanica”, mentre se la zona di pertinenza è molto grande avremmo delle differenze significative nei due processi. Dove la “zona di pertinenza” fosse sufficientemente piccola da non dover comportare differenziazioni importanti di tipo meccanico si è preferito non fare distinzioni. Dove la zona di pertinenza fosse un fattore cruciale si è scelto di individuare due varianti o addirittura di classificare la reazione in due differenti meccaniche.

4.5 “Meccaniche di formazione” e loro classificazione

Le meccaniche di formazione delle superfici sono molte e le ‘serie meccaniche’ evolvono in maniera molto diversa in base ai fattori intrinseci o estrinseci al materiale. Comunque in base alle distinzioni fatte fino ad ora le meccaniche possono essere anzitutto divise in due grandi gruppi che analizzeremo separatamente:

- Meccaniche a taglio prevalente
- Meccaniche ibride

Le meccaniche ‘a taglio prevalente’ derivano da ‘scissioni per taglio’ e che quindi che non sono caratterizzate da ‘cedimento’, mentre le ‘meccaniche ibride’ inglobano reazioni diverse dal taglio e quindi in generale sono legate ad una ‘scissione con cedimento’.

4.5.1 Meccaniche a taglio prevalente

Per tali meccaniche la “zona di pertinenza” è assai ridotta, e probabilmente riguarda esclusivamente le immediate prossimità al punto di tangenza. La scissione del materiale avviene per ‘sollecitazione a taglio’ ed il materiale è sufficientemente resistente da permettere che il taglio avvenga senza cedimenti.

4.5.2 Meccaniche ibride

Fanno parte di questo gruppo tutte le meccaniche che portano alla formazione della superficie con una modalità che differisca da quella della “sollecitazione a taglio”. Il principio di classificazione di queste meccaniche parte dalla divisione in tre grandi classi indicanti se la serie meccanica abbia come conseguenza: una riorganizzazione del materiale comunque presente sulla “superficie teorica”, l’asportazione di parte di questo, o una situazione intermedia tra le due (vedi

Fig. 4.10). Su questo principio si dividono le “meccaniche ibride” in tre **classi di formazione**:

- per “spostamento di materia”, quando la superficie subisce delle alterazioni e il materiale non viene asportato sotto il piano di lavorazione, ma si ha piuttosto una riorganizzazione della superficie;
- per “distacco di materia”, quando durante il taglio si ha l’asportazione di materiale al di sotto del piano di lavorazione ed il suo completo distacco dalla superficie;
- in “modalità mista”, quando si verificano contemporaneamente i fenomeni di “spostamento” e “distacco di materia”.



(a) Spostamento di materia (X1) (b) Per distacco di materia (X2)

Figura 4.10: Si illustrano le due classi principali: per ‘spostamento di materia’ su pioppo nero (a) dove nonostante il fatto che la materia sia spostata rimettendola al suo posto si riesca a ricreare la superficie, e per ‘distacco di materia’ (b) in cui si vede che la materia è stata asportata completamente dalla superficie — Formation de défauts par déplacement de matière sur du peuplier (a) et par enlèvement de matière sur du douglas (b). [Foto Goli]

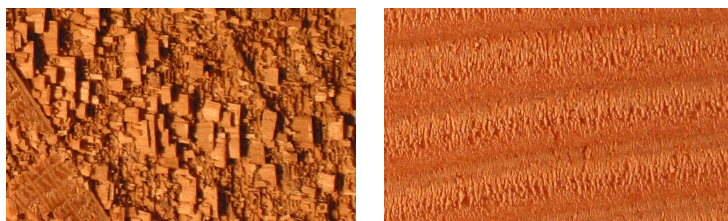
Queste “classi di formazione” sono a loro volta divise in **meccaniche principali** in base al principio della “reazione meccanica”. Tale reazione è quella che si verifica per prima, quella maggiormente legata all’origine della serie e può essere:

- “a trazione trasversale prevalente”, che individua le lavorazioni eseguite “controfilo” e talvolta a “filo dritto”
- “a compressione trasversale prevalente”, che individua le lavorazioni eseguite “nel senso del filo” o le lavorazioni “di testa”.

Un ulteriore importante carattere di distinzione è la *modalità di rottura* o di *cedimento*, che caratterizza la così detta **meccanica secondaria**. Si distingue tra rottura e cedimento perché nel caso del distacco di materia, come nel caso della modalità mista, si ha una vera e propria “rottura”, mentre nel caso dello spostamento di materia si hanno dei “cedimenti”, che portano ad una riorganizzazione della superficie (vedi Fig. 4.11). Se ne sono individuati più tipi:

- rottura a flessione
- rottura a trazione longitudinale

- cedimento parziale
- cedimento plastico
- cedimento elastico



(a) Rottura a flessione (X2)

(b) Cedimento plastico (X2)

Figura 4.11: Si riporta a titolo di esempio una meccanica secondaria con ‘rottura a flessione’ (a) su quercia ed una per rottura a ‘cedimento plastico’ (b) su douglasia — Exemples de mécaniques secondaires : rupture en flexion sur du chêne (a) et par endommagement plastique sur du douglas (b). [Foto Goli]

Infine per ogni ‘meccanica secondaria’ si distinguono sotto-meccaniche e varianti. Le singole **sotto-meccaniche** sono indicate da un numero progressivo da accoppiare alla lettera indicante la “meccanica secondaria”. Meccaniche simili sono quindi indicate con la stessa lettera e distinte dal numero. Le **varianti** descrivono invece diversità nella serie meccanica imputabili al fatto che la lavorazione avvenga in ‘discordanza’ o in ‘concordanza’³.

4.5.3 Classificazione delle meccaniche

La lista completa delle meccaniche di formazione delle superfici è riportata nello schema seguente:

- Meccaniche a taglio prevalente
- Meccaniche ibride
 - Per spostamento di materia
 - A trazione trasversale prevalente
 - e cedimento parziale (tipo A1⁴ var. 1 e 2)
 - e cedimento plastico (tipo B1⁵)
 - A compressione trasversale prevalente
 - e cedimento elastico (tipo C1⁶, C2⁷)

³Tali differenze sono legate alle differenti meccaniche di taglio. Lavorando in concordanza il coltello inizia il taglio dalla parte più fine del truciolo proseguendo la sua traiettoria verso l’alto, in concordanza il taglio inizia dalla parte più spessa del truciolo e la sua traiettoria del tagliente è discendente.

⁴Riconducibile alla *fibra lanuginosa*.

⁵Riconducibile alla *fibra schiacciata*.

⁶Riconducibile al *legno primaverile sporgente*.

⁷Riconducibile ai *vasi uncinati*.

e cedimento plastico (tipo D1⁸, D2⁹)

- Per distacco di materia¹⁰
 - A trazione trasversale prevalente
e rottura a flessione (tipo E1, E2, E3)
 - A compressione trasversale prevalente
e rottura a trazione longitudinale (tipo F1, F2 *var. 1 e 2*)
- In modalità mista¹¹
 - A trazione trasversale prevalente
e rottura a flessione (tipo G1)

La classificazione delle “origini meccaniche” dovrà essere poi integrata dalla comparazione con la “classificazione visuale” per stabilire una relazione causa-effetto.

⁸Riconducibile alla *fibra rialzata*.

⁹Nominata *fibra pettinata - effetto lucido*.

¹⁰Riconducibile alla *fibra strappata*.

¹¹Riconducibile alla *fibra embriciata*.

Mécanique de formation des surfaces

Sollicitations

Tous les défauts trouvant leur origine dans le fait que l'outil n'arrive pas à couper correctement le bois, il est essentiel de décrire le processus de coupe. L'action de la coupe du bois consiste en la séparation de la matière par rapport à la surface décrite par l'arrêt de l'outil s'accompagnant de la déflexion de la matière enlevée. Dans le cas du bois l'action de la coupe n'est pas simplement liée aux caractéristiques de base de l'outil et du matériau bois, mais aussi à l'orientation de celui-ci dans l'espace (anisotropie du bois et de certains de ses dérivés). L'outil applique des sollicitations au matériau qui y répond par une réaction appelée "résistance à la coupe". La résistance à la coupe et la résistance opposée par les éléments cellulaires concernées l'action mécanique de l'outil pendant le processus de coupe. Le rapport entre les sollicitations de l'outil et la résistance à la coupe va définir l'évolution de la surface usinée et en particulier la "modalité de séparation".

Modalité de séparation

La séparation du copeau de la pièce peut se passer de deux façons principales selon que la coupe intervienne par cisaillement ou par endommagement:

- *séparation par cisaillement*
- *séparation par endommagement*

Séparation par cisaillement et surface théorique

La séparation sera dite par cisaillement lorsque la "résistance à la coupe" sera inférieure à la résistance mécanique du matériau (réaction maximale) dans la direction de sollicitation. Dans ce cas, la séparation sera nette au niveau de la trajectoire de l'outil. La surface obtenue avec cette modalité de séparation se situe très près de la "surface théorique". Surface théorique: est la surface résultante de la combinaison de la trajectoire de l'outil et de celle de la pièce de bois. Cette surface représente la référence par rapport à laquelle on compare les surfaces obtenues.

Séparation par endommagement

La séparation sera dite par endommagement lorsque la “résistance à la coupe” est plus importante que la résistance mécanique du matériau (réaction maximale) dans la direction de sollicitation. Dans ce cas, la séparation se passe dans une position différente de celle de la trajectoire de l’outil. Ce mode de séparation peut se produire avec deux réactions du matériau:

- *réaction en traction transversale*
- *réaction en compression*

selon que l’usinage entraîne une compression de la matière usinée ou au contraire un dégagement. Ainsi, un usinage dans le sens du fil ou en bout entraîne une compression du bois lorsqu’on se situe en contre-fil alors qu’en droit fil cet usinage entraînerait une traction vers le haut des éléments cellulaires.

Zone fonctionnelle et succession mécanique

La coupe est un processus dynamique et donc dans le temps des mécaniques différentes se développent dans des zones différentes. Pour cette raison on définit une “zone fonctionnelle” comme étant la zone dans laquelle les sollicitations mécaniques induites par des conditions d’usinage fixées influent sur la surface usinée. Les sollicitations mécaniques qui se suivent dans le temps sur cette zone et qui concourent à la formation de la surface représentent une “succession mécanique”. On définit donc la “succession mécanique” comme la succession dans le temps de l’ensemble des sollicitations mécaniques dans une “zone fonctionnelle” qui sont à la base de l’état final d’une surface usinée.

Mécaniques de formation et leur classification

Les mécaniques de formation des surfaces peuvent donc être classifiées en considérant la succession mécanique. On commence à définir le type de séparation pour analyser ensuite le type de réaction du matériau et le type d’endommagement. En considérant le type de séparation, on peut obtenir deux mécaniques:

- *mécanique par coupe prédominante*
- *mécanique hybride*

la première concerne une séparation par cisaillement, la deuxième une séparation par endommagement.

Mécanique par coupe prédominante

La qualité de la surface est bonne et la coupe régulière.

Mécanique hybride

Lors de la séparation il y a un endommagement qui peut se décrire suivant trois modalités ou “classe de formation”:

- déplacement de matière
- détachement de matière
- modalité mixte

Les classes de formation peuvent être divisée en deux “mécaniques primaires”:

- réaction en traction transversale
- réaction en compression

qui peuvent elles même être divisées dans cinq mécaniques secondaires selon le type de rupture ou d’endommagement (identifiées par une lettre majuscule):

- rupture en flexion
- rupture en traction longitudinale
- endommagement partiel
- endommagement plastique
- endommagement élastique

Les mécaniques secondaires peuvent être divisées en “sub mécaniques” indiquées par un numéro à côté de la mécanique secondaire et parmi deux variantes qui indiquent s’il y a des différences en usinant en avalant ou en opposition.

Classification

Ainsi le schéma complet de la classification des mécaniques de formation des surfaces est le suivant :

- Mécanique par coupe prédominante
- Mécanique hybride
 - Déplacement de matière
 - Réaction à traction transversale
 - endommagement partiel (tipo A1¹² var. 1 e 2)
 - endommagement plastique (tipo B1¹³)
 - Réaction en compression

¹² Surfaces pelucheuses

¹³ Fibres comprimées

endommagement élastique (tipo $C1^{14}$, $C2^{15}$)

endommagement plastique (tipo $D1^{16}$, $D2^{17}$)

- *détachement de matière¹⁸*
 - *Réaction en traction transversale*
rupture en flexion (tipo $E1$, $E2$, $E3$)
 - *Réaction en compression*
rupture en traction longitudinale (tipo $F1$, $F2$ var. 1 e 2)
- *Modalité mixte¹⁹*
 - *réaction en traction transversale*
rupture en flexion (tipo $G1$)

¹⁴ *Bois de printemps proéminent*

¹⁵ *Vaisseaux “rappeurs”*

¹⁶ *Fibres soulevées*

¹⁷ *Effet mat*

¹⁸ *Fibres arrachées*

¹⁹ *Fibres retournées*

Capitolo 5

Qualità finale e meccaniche di formazione

Sommario: Si analizzano in maniera comparata le meccaniche di formazione ed i conseguenti stati finali delle superfici a seguito di lavorazione. Ogni meccanica sarà messa in relazione allo stato della “superficie conseguente” e gli stati delle superfici saranno spiegati in base alla loro origine meccanica.

5.1 Introduzione

Una volta introdotti gli elementi fondamentali riguardanti la ‘qualità finale’ delle superfici lavorate e gli aspetti legati alla loro origine meccanica si può procedere ad un’analisi comparata. Questo approccio alle superfici a prescindere dalla gravità estetica derivante dall’interazione meccanica si pone come obiettivo quello di accoppiare ad ogni singolo difetto la sua origine meccanica, e ad ogni meccanica di formazione uno stato conseguente della superficie, al fine di comprendere profondamente le interazioni alla base dell’origine delle superfici.

5.2 Classificazione delle meccaniche

Le singole meccaniche sono descritte e classificate in base al sistema di seguito riassunto. La prima distinzione avviene in base all’origine meccanica:

si hanno due tipi di *origine meccanica*: “meccaniche a taglio prevalente” e “meccaniche ibride”

Mentre per le ‘meccaniche a taglio prevalente’ non è necessaria nessuna ulteriore distinzione, quelle ‘ibride’ si suddividono ulteriormente:

si sono descritte tre *classi di formazione* (per spostamento di materia, per asportazione di materia, e per modalità mista)

Queste sono suddivise in base al tipo di reazione della superficie alla sollecitazione:

si sono descritte due *meccaniche principali* (a trazione trasversale prevalente, a compressione trasversale prevalente)

Si sono ulteriormente divise in base alla modalità di rottura o cedimento:

si sono descritte più *meccaniche secondarie* (per cedimento parziale, per cedimento elastico, per cedimento plastico, per rottura a trazione longitudinale, per rottura a flessione) a cui si è attribuita una lettera

Le Meccaniche secondarie a loro volta sono state ulteriormente divise:

si sono individuate più *sotto-meccaniche* a cui si è attribuito un numero da affiancare alla lettera indicante la “meccanica secondaria”.

Un’ultima distinzione deriva dal tipo di lavorazione e descrive per la stessa “sotto-meccanica” piccole differenze dovute alla tecnologia di lavorazione:

esistono eventualmente due varianti in base al fatto che le lavorazioni eseguite in ‘discordanza’ e in ‘concordanza’ portino a differenze nella sotto-meccanica (*var. 1 e var. 2*).

Riassumendo le meccaniche si distinguono in base alle diversità presenti nella “serie meccanica” e la prima distinzione avviene in base all’origine meccanica in “meccaniche a taglio prevalente” e “meccaniche ibride”. Mentre per le “meccaniche a taglio prevalente” non è necessaria nessuna ulteriore descrizione, per le “meccaniche ibride” la classificazione si sviluppa secondo la seguente successione di elementi descrittivi:

classe di formazione $\rightarrow$ meccanica principale $\rightarrow$ meccanica secondaria¹ $\rightarrow$ sottomeccanica² $\rightarrow$ variante³.

5.3 Meccaniche e relativi “stati conseguenti”

Ad ogni meccanica di formazione corrisponde quello che definiremo uno *stato conseguente*.

Si definisce “stato conseguente” lo stato qualitativo della superficie finale conseguente una determinata meccanica di formazione.

Di seguito analizzeremo approfonditamente le singole meccaniche e lo faremo in maniera congiunta al loro “stato conseguente”.

5.3.1 Meccaniche a taglio prevalente

Non hanno bisogno di nessuna ulteriore suddivisione. La scissione avviene per taglio e la superficie conseguente generalmente è di ottima qualità. Questa meccanica riguarda sia le lavorazioni eseguite in discordanza che quelle eseguite in concordanza (vedi Fig. 5.1).

¹Indicata con una lettera maiuscola

²Indicata con un numero

³Se eventualmente presente

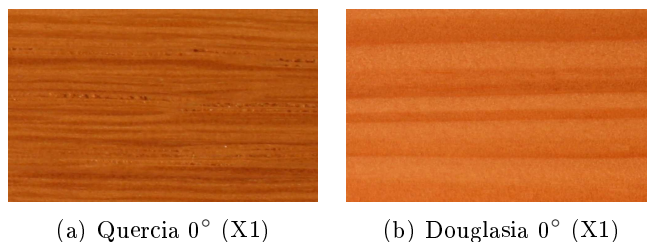


Figura 5.1: Superfici ottenute con meccaniche agenti “per taglio prevalente” su quercia (a) e douglasia (b) fotografate a basso ingrandimento. Si noti come lo ‘stato conseguente’ della superficie sia la ‘superficie teorica’, e siano quindi caratterizzate dall’assoluta ‘assenza di difetti’ — Surfaces de bonne qualité obtenues par coupe prédominante dans du douglas (a) et du chêne (b). L’état induit est la “surface théorique” et la surface est caractérisé par une complète absence de défauts. [Foto Goli]

5.3.2 Meccaniche ibride

Alle meccaniche ibride è legata una scissione ‘con cedimento’ del materiale e quindi conseguenza diretta di queste meccaniche è il formarsi dei così detti ‘difetti di lavorazione’. Di seguito saranno esaminate in maniera approfondita queste meccaniche ed i loro ‘stati conseguenti’.

Per spostamento di materia

Questa “meccanica principale” è all’origine di molte problematiche superficiali, tra cui quelle che si manifestano visivamente con i problemi della ‘fibra lanuginosa’, della ‘fibra schiacciata’, della ‘fibra rialzata’, del ‘legno primaverile sporgente’ e dei ‘vasi uncinati’. Avviene per movimentazione di materiale, quindi la riorganizzazione della superficie a seguito del taglio implica la presenza di tutto il materiale della superficie teorica, anche se disposto diversamente rispetto a questa. La movimentazione di materiale può avvenire con molteplici modalità; a carico del legno estivo, del primaverile o di entrambi, lavorando nel senso del filo e controfilo e lavorando sia in discordanza che in concordanza. Si hanno 4 meccaniche secondarie per un totale di 5 sotto-meccaniche individuate dalle seguenti tipologie: A1 (var. 1 e var. 2), B1, C1, D1 e D2.

“Tipo A1”: per spostamento di materia a trazione trasversale prevalente e cedimento parziale - ‘fibra lanuginosa’

Questa meccanica si realizza lavorando esclusivamente controfilo e a bassi angoli della fibratura, sia in discordanza che in concordanza, ad esclusivo interesse del legno a bassa densità e alta plasticità nelle latifoglie e del legno primaverile nelle conifere. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra -10° e -30° . Il difetto conseguente è la ‘fibra lanuginosa’. Presenta due varianti a seconda che la lavorazione sia effettuata in discordanza oppure in concordanza (Fig. 5.2).

Questa meccanica, che si manifesta visivamente col problema delle “*fi-bre lanuginose*”, interessa generalmente il legno primaverile delle conifere,

anche se è riscontrabile nelle latifoglie che presentino un legno molto plasmabile e a bassa densità (come ad esempio pioppo nero e tiglio). Il difetto visuale è caratterizzato da porzioni di fibre parzialmente strappate e sollevate dalla superficie, che vi rimangono ancorate su un lato. Sull'altro lato naturalmente sono libere di muoversi al di sopra del livello medio della superficie. La formazione del difetto avviene 'per spostamento di materia', perché i fasci di fibre sollevati lasciano un corrispondente infossamento sulla superficie. Il legno delle conifere o delle latifoglie da cui si origina questa meccanica è tipicamente a bassa densità ed elevata plasticità (almeno ad umidità normale). Per questo, gli elementi cellulari se lavorati a piccoli angoli controfilo tendono a collassare su se stessi anziché essere tagliati, e quindi ad essere spinti nella direzione di avanzamento del coltello. Questo difetto si forma per piccoli angoli della fibratura perché ad angoli più importanti si ha o la compressione del legno primaverile (E1) o la sua compressione e conseguente asportazione per trazione longitudinale (C2). Per umidità del legno più elevate questo difetto si aggrava a causa della maggiore duttilità. Tale difetto si può formare sia davanti al coltello, per spinta, sia dietro di questo.

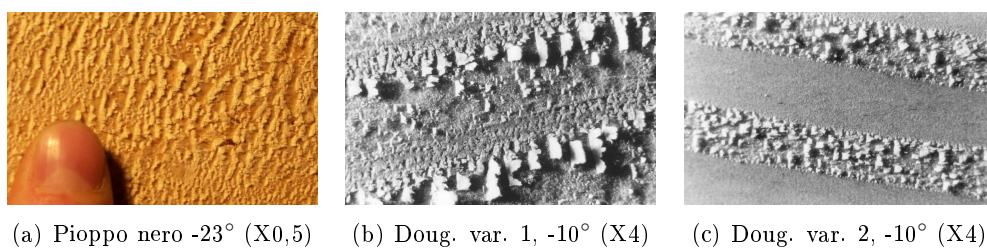


Figura 5.2: Visione generale del problema della 'fibra lanuginosa'. Un caso estremamente flagrante su pioppo nero (a) ascrivibile alla variante 1, e due casi importanti su douglasia ascrivibili alla variante 1 (b) e alla variante 2 (c). Si noti come essendo una meccanica che si origina per spostamento di materia, rimettendo al loro posto le fibre sollevate si otterrebbe qualcosa di molto simile alla 'superficie teorica'. Si noti inoltre come nel pioppo la problematica interessi senza distinzione legno primaverile ed estivo, mentre nella douglasia sia ad esclusivo carico del legno primaverile — Surfaces pelucheuses var. 1 sur peuplier (a) et sur douglas (b), et var 2 sur douglas (c). [Foto Goli]

Si hanno due varianti meccaniche ed estetiche a seconda che la lavorazione sia effettuata in discordanza o in concordanza:

- *var. 1: lavorando in discordanza.* I suoi caratteri generali sono lo spessore variabile, la lunghezza variabile e la distribuzione irregolare su tutto il legno o su tutta la superficie dei fasci di fibre sollevati (vedi Fig. 5.3). I fasci di fibre vengono sollevati e poi spinti nella direzione di avanzamento del coltello. Una volta sollevati e orientati in quella direzione il taglio diventa difficoltoso, e le successive passate del coltello li spingono ulteriormente nella sua direzione di avanzamento. Il processo è dinamico ed

interessa più passate del coltello, le fibre spinte nel punto di tangenza del coltello trovano riparo negli infossamenti lasciati dalle fibre distaccate dalla passata precedente lungo l’arco di taglio, sfuggendo così al taglio e rimanendo sporgenti sulla superficie. È questo il motivo per cui i fasci di fibre possono avere spessore e lunghezza variabili, e possono essere distribuiti in maniera disordinata. Una volta sollevati fasci di fibre per sollecitazione a trazione trasversale il coltello continua la sua corsa flettendoli su un lato e poi passandoci sopra lasciando evidenti segni di compressione. Si forma esclusivamente lavorando in discordanza perché un’interazione dinamica su più passaggi è possibile esclusivamente con questa tecnologia di lavorazione. Infatti il moto relativo dell’utensile si attua nella direzione della superficie ancora da lavorare, mentre in concordanza nella direzione opposta.

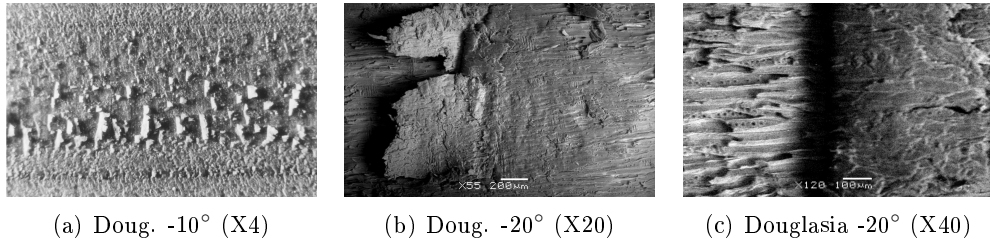


Figura 5.3: ‘Fibre lanuginose’ di tipo A1 var. 1 su douglasia. Si noti la diversità tra differenti fasci di fibre sollevati (a). In (b) si noti come la compressione sugli elementi rigirati (raddrizzati prima della foto) abbia creato una nicchia di compressione. In (c) è ben visibile invece, sul lato destro l’azione di compressione sugli elementi cellulari esercitata dal coltello nel passaggio, mentre a sinistra la zona di sollevamento per trazione trasversale con gli elementi cellulari è in perfette condizioni — Surfaces pelucheuses type A1 var. 1 sur douglas (a). Dans (b) la niche provoquée par la compression de la fibre sur la surface pendant le passage du couteau est bien visible. Dans (c) la partie où la fibre a été arrachée (gauche) et la partie où elle a été comprimée (droite) sont bien visibles. [Foto Goli]

- *var. 2: lavorando in concordanza.* In questo caso l’interazione tra legno e tagliente è diversa dal caso precedente perché il moto relativo del coltello è concorde a quello del legno. Le fibre vengono quindi spinte nella direzione opposta a quella in cui avanza il coltello e soprattutto nella direzione della superficie già lavorata. Questo non permette un’interazione meccanica che si suddivida in un processo di più passaggi, ma il tutto deve avvenire a livello di singola passata, quindi durante l’asportazione di un singolo truciolo. Il fatto che l’interazione avvenga a livello di singola passata e che il coltello avanzi in direzione opposta a quella in cui è sollevato il legno comporta uno spessore ed un’altezza costanti delle parti sollevate, e soprattutto una minore compressione degli elementi, che rimangono cotonosi sopra la superficie (vedi Fig. fig:filanv2).

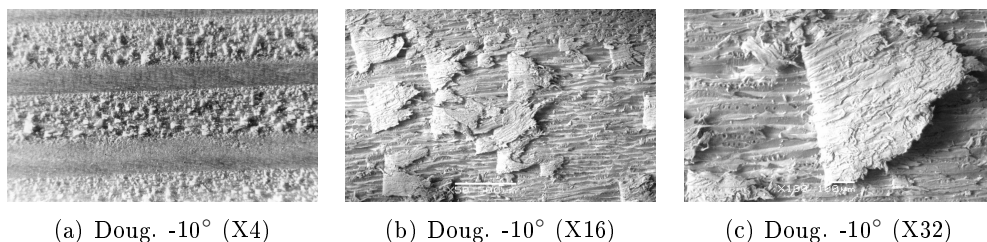


Figura 5.4: ‘Fibre lanugineuse’ di tipo A1 var. 2 su Douglasia. Si noti la maggiore cotonosità e regolarità di distribuzione in (a). In (b) e (c) si osserva chiaramente la maggiore uniformità di queste fibre nonché la minore compressione esercitata dal coltello durante il passaggio sulla superficie — Surfaces pelucheuses type A1 var. 2 sur douglas (a). La var. 2 présente une distribution plus uniforme des fibres et une plus faible compression des fibres. [Foto Goli]

“Tipo B1”: per spostamento di materia a trazione trasversale prevalente e cedimento plastico - ‘fibra schiacciata - effetto opaco’

Questa meccanica si realizza lavorando esclusivamente controfilo, ad angoli medio-alti della fibratura, sia in discordanza che in concordanza, ed interessa il legno primaverile, l’estivo e con particolare enfasi il legno intermedio. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra -30° e -90° . Il difetto conseguente è la ‘fibra schiacciata’ (Fig. 5.5).

Questa reazione meccanica, riconducibile a quello che si manifesta visivamente col problema della “fibra schiacciata - effetto opaco”, si verifica sia sul legno primaverile che su quello estivo, ma spesso, in maniera molto marcata, sul legno di transizione tra quello primaverile e quello estivo. Si forma esclusivamente lavorando controfilo. Gli elementi sono troppo verticali per essere sollevati oppure troppo plasmabili per essere tagliati in maniera netta e pulita. Il taglio avviene infatti per cedimento a compressione trasversale, gli elementi collassano su se stessi e vengono pressati nella direzione di avanzamento del coltello rimanendo rigidamente piegati sulla superficie. Tale fenomeno causa grossi movimenti di materiale per le densità medio-basse, mentre per densità più elevate le fibre si sostengono, rendendo talvolta impercettibile o poco percettibile questo fenomeno (superfici opache). Lo schiacciamento conseguente il passaggio del coltello fa sì che le superfici abbiano un aspetto irregolare, e contemporaneamente che gli elementi schiacciati siano estremamente rigidi al tatto. Questo problema si manifesta anche lavorando latifoglie a vasi grandi, ma rimane localizzato nelle zone a bassa densità attorno ai vasi.

Meccanica C: si realizza per spostamento di materia a compressione trasversale prevalente e cedimento elastico, e al suo interno si distingue il ‘Tipo C1’ ed il ‘Tipo C2’ a seconda che la meccanica si verifichi a causa della differente densità tra legno primaverile ed estivo oppure a causa della disposizione dei vasi nelle specie a vasi grandi.

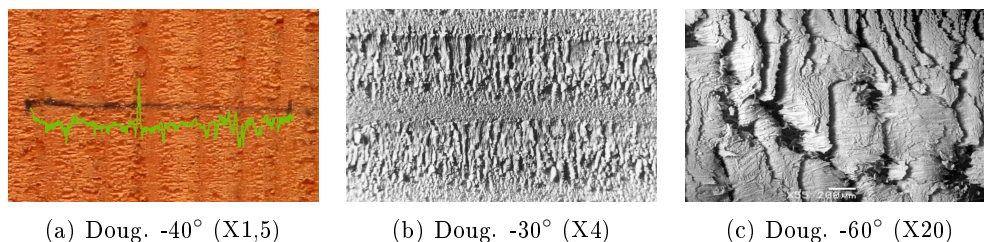


Figura 5.5: ‘Fibra schiacciata’ di tipo B1 su Douglasia fotografata a basso (a), medio (b) ed elevato (c) ingrandimento. Alla figura (a) si è sovrapposto il profilo misurato con rugosimetro. Le fibre sono schiacciate di lato e rimangono estremamente rigide al tatto — Fibres comprimées dans du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). Les fibres sont très rigides sur la surface. [Foto Goli]

“Tipo C1”: per spostamento di materia a compressione trasversale prevalente e cedimento elastico - ‘legno primaverile sporgente’

Questa meccanica si realizza lavorando esclusivamente nel senso del filo, ad angoli medio-bassi della fibratura⁴, sia in discordanza che in concordanza, ad esclusivo interesse di legni eterogenei. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra 10° e 50°. Lavorando in concordanza questa meccanica è più intensa che in discordanza, a causa della maggiore compressione esercitata dal moto discendente del tagliente, anche se tale differenza non è sufficiente ad individuarne due varianti. Il difetto conseguente è il ‘legno primaverile sporgente’ (Fig. 5.6).

Questa meccanica è riconducibile al difetto minore denominato ‘legno primaverile sporgente’. Si manifesta lavorando nel senso del filo a bassi angoli della fibratura, in particolar modo su materiali eterogenei, cioè presentanti una grossa differenza di densità tra legno primaverile ed estivo. A causa dell’inclinazione della fibratura, le fibre, anziché essere tagliate, subiscono una compressione trasversale, che a loro volta esercitano sugli elementi sottostanti. La differente densità esistente tra le due parti anatomiche determina un differente assorbimento dello “shock” ed una differente reazione elastica (che a sua volta determina un differente ‘ritorno elastico’). Il legno primaverile, potendo essere maggiormente compresso a causa della sua cedevolezza, a seguito del taglio ha un ritorno elastico maggiore dell’estivo, risultando più sporgente sulla superficie rispetto a quest’ultimo. Da un punto di vista qualitativo la superficie è buona e si percepisce soltanto che i due legni giacciono su di un piano differente. Questo comportamento è tanto più evidente quanto maggiore è la capacità del legno di reagire in maniera elastica. Essiccando molto il legno, il primaverile viene perfettamente tagliato, perché meno duttile e maggiormente rigido⁵.

⁴Per angoli medi si ha lo stesso problema, ma è meno evidente a causa delle numerose altre meccaniche che affliggono la superficie.

⁵Per capire questo concetto si pensi ad una spugna umida e ad una spugna secca.

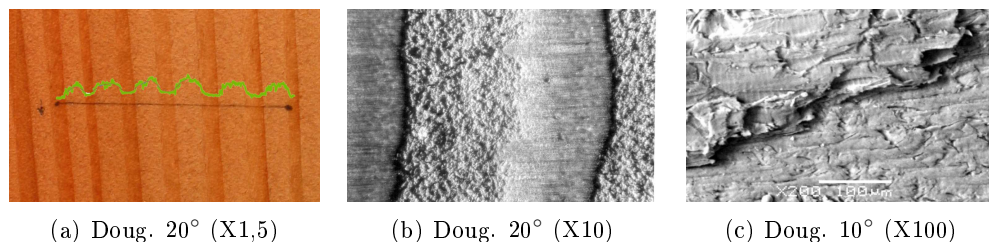


Figura 5.6: “Legno primaverile sporgente” di tipo C1 fotografato su Douglasia a differente ingrandimento. Si osservi in (a) come la superficie sia di buona qualità anche se il profilo rende evidente le gobbe che si intravedono ad occhio nudo. Il fenomeno è ancora più evidente in (b), legno primaverile a sinistra ed estivo a destra, ed in (c), legno primaverile sopra e legno estivo sotto — Bois de printemps proéminent sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli]

“Tipo C2”: per spostamento di materia a compressione trasversale prevalente e cedimento elastico - ‘vasi uncinati’

Questa meccanica si realizza lavorando esclusivamente nel senso del filo, ad angoli medio-bassi della fibratura⁶, sia in discordanza che in concordanza, ad esclusivo interesse delle specie a vasi grandi. Si manifesta abitualmente per angoli della fibratura compresi tra 10° e 30° ma si può presentare anche per angoli maggiori. Il difetto conseguente sono i ‘vasi uncinati’ (Fig. 5.7).

Questa meccanica è riconducibile al difetto minore denominato ‘vasi uncinati’. Si manifesta lavorando nel senso del filo a bassi angoli della fibratura in specie a vasi grandi. A causa dell’inclinazione della fibratura, le fibre, anziché essere tagliate, subiscono una compressione trasversale, e a loro volta esercitano una compressione sugli elementi sottostanti. In prossimità del vaso, non essendoci elementi sottostanti ad offrire il loro sostegno, gli elementi cellulari vengono spinti dentro al vaso per tornare nella posizione iniziale una volta venuta meno la spinta del coltello. Tali elementi restano quindi sporgenti causando un disturbo estetico, ma soprattutto tattile.

Meccanica D: si realizza per spostamento di materia a compressione trasversale prevalente e cedimento plastico, e al suo interno si distingue il ‘Tipo D1’ ed il ‘Tipo D2’ a seconda che la meccanica interessi separatamente il legno primaverile ed estivo o li coinvolga in un unico processo.

“Tipo D1”: per spostamento di materia a compressione trasversale prevalente e cedimento plastico - ‘fibra rialzata’

Questa meccanica si realizza lavorando esclusivamente nel senso del filo, ad angoli medio alti della fibratura, sia in discordanza che in concordanza, ad esclusivo interesse del legno estivo nelle specie a legno eterogeneo. Si manifesta per angoli della fibratura

⁶ Per angoli medi si ha lo stesso problema, ma è meno evidente a causa delle numerose altre meccaniche che affliggono la superficie.

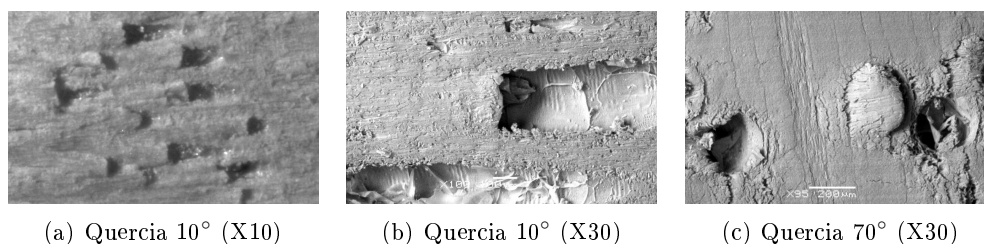


Figura 5.7: ‘Vasi uncinati’ ripresi a medio ed alto ingrandimento su legno di quercia. Si noti come nella parte sinistra il bordo del vaso risulti sporgente a causa del ritorno elastico (a) e (b). In (c) si osserva invece un vaso completamente ricoperto lavorando a 70°. Per angoli così elevati la meccanica è diversa, con un maggior contributo di componenti plastiche ma vista la sua scarsa importanza si è preferito non classificarla a parte — Vaisseaux rappeurs sur du chêne observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli]

compresi tra 30° e 70°. Il difetto conseguente è la ‘fibra rialzata’ (Fig. 5.8).

Questa reazione meccanica è riconducibile al problema della “*fibra rialzata*”. Si manifesta lavorando nel senso del filo per angoli della fibratura medio-alti, a carico del legno estivo, quando tra questo ed il legno primaverile c’è una forte differenza di densità. Tale differenza di densità, anche se condizione necessaria, non è sufficiente alla formazione di questo difetto. Infatti affinché si origini è necessario che le bande omogenee del legno estivo durante la lavorazione siano premute sul legno primaverile senza avere la possibilità di autosostenersi. La parte di legno estivo, adiacente al legno primaverile, non potendo autosostenersi e non potendo essere sostenuta dal legno primaverile, si piega, cede plasticamente e viene trascinata sopra al legno primaverile. Il legno primaverile si adugia ed il legno estivo vi resta sopra, leggermente sporgente sulla superficie una volta passato il coltello.

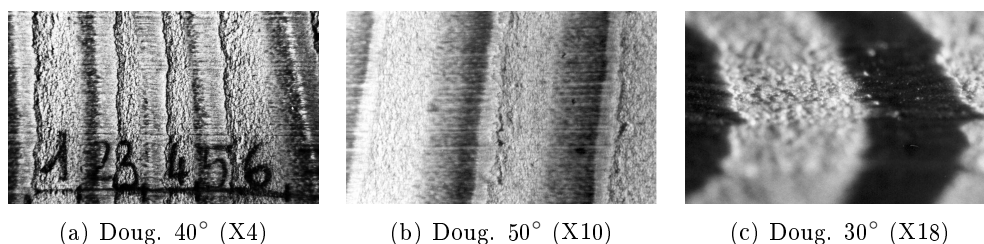
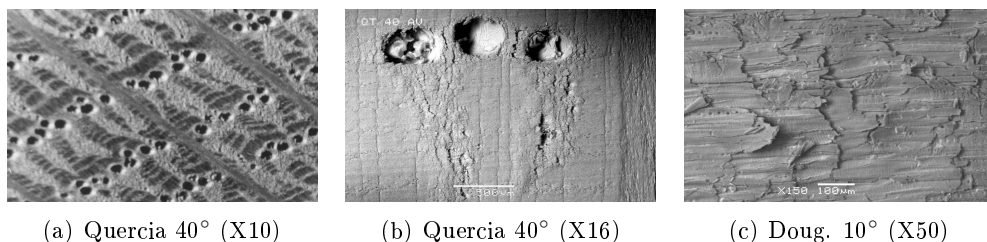


Figura 5.8: ‘Fibra rialzata’ di tipo D1 a medio ed alto ingrandimento su legno di douglasia. Si noti come il legno estivo abbia ceduto e rimanga piegato su un lato per cedimento di tipo plastico. In (b) la fascia chiara ben visibile al limite destro del legno estivo rappresenta la parte compressa dal coltello, e soltanto l’estremità di questa rimane sporgente sopra il legno primaverile (c) — Fibres soulevées sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli]

“Tipo D2”: per spostamento di materia a compressione trasversale prevalente e cedimento plastico - ‘fibra pettinata - effetto lucido’

Questa meccanica si realizza lavorando esclusivamente nel senso del filo, ad angoli della fibratura bassi, medi e alti, sia in discordanza che in concordanza, ed interessa tutti i tipi di legno, anche se principalmente quelli a media densità. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra 10° e 80° . Il difetto conseguente è la ‘fibra pettinata - effetto lucido’ (Fig. 5.9).

Il difetto che scaturisce da questa meccanica è stato descritto in questa sede con il nome di “*fibres peignées - effet lucide*”⁷. Questa meccanica deriva da lavorazioni eseguite esclusivamente nel senso del filo. Gli elementi cellulari orientati nel senso del filo tendono a piegarsi lateralmente sotto la spinta del coltello, in modo diverso a seconda della loro densità. Per gli elementi meno densi, cioè meno capaci di autosostenersi, lo schiacciamento sarà maggiore. Gli elementi più densi, invece, subiranno uno schiacciamento minore, e tenderanno a formare quelle che si sono definite come “superfici lucide”. Le fibre, schiacciate di lato, assumono un aspetto omogeneo, definibile “pettinato”.



(a) Quercia 40° (X10)

(b) Quercia 40° (X16)

(c) Doug. 10° (X50)

Figura 5.9: ‘Fibre pettinate’ di tipo D2 su quercia (a,b) e douglasia (c). Si osservi in (a) come nelle parti a minor densità (attorno ai vasi) le fibre risultino schiacciate e piegate su un lato in maniera ben visibile, mentre in quelle a maggior densità il fenomeno è percepibile come ‘superficie lucida’. La stessa cosa è maggiormente visibile in (b). In (c) si noti come il lume cellulare delle fibrotracheidi della douglasia risulti completamente schiacciato — *Fibres couchées sur du chêne (a, b) et du douglas (c).* [Foto Goli]

Per distacco di materia

Questa “meccanica principale” è riconducibile a quello che si manifesta visivamente col problema delle “*fibres strappées*” e delle “*fibres embriciées*” di tipo strappato. Avviene per “distacco di materia”, quindi per asportazione di materia rispetto a quella della ‘superficie teorica’. I distacchi possono avvenire sia nel legno estivo che nel legno primaverile che in entrambi, lavorando sia nel senso del filo che controfilo e sia in concordanza che in discordanza. Il fatto che la lavorazione avvenga in concordanza o in discordanza è fattore determinante per l’ottenimento della ‘fibra strappata’ o dalla ‘fibra embriciata’. Fanno parte di

⁷L’effetto lucido è una manifestazione leggera della fibra pettinata.

questa classe di formazione cinque differenti tipi di meccaniche: E1, E2, E3, F1, F2.

Meccanica E: si realizza per distacco di materia a trazione trasversale prevalente e rottura a flessione, e al suo interno si distinguono il ‘Tipo E1’ ed il ‘Tipo E2’, che fanno parte delle fibre strappate, a seconda che la meccanica interessi separatamente il legno primaverile ed estivo o li coinvolga in un unico processo, ed il ‘Tipo E3’, che è riconducibile alle ‘fibre embriciate’ strappate. Il difetto si forma lavorando esclusivamente controfilo con tecnologia discorde per E1 ed E2⁸, ed esclusivamente con tecnologia concorde per E3. La modalità di formazione di E3 è simile a quella di H1 ma in E3 gli elementi sollevati sono strappati via.

“Tipo E1”, per distacco di materia a trazione trasversale prevalente e rottura a flessione (di tipo omogeneo) - ‘fibra strappata’

Questa meccanica si realizza lavorando controfilo, ad angoli bassi, medi e alti della fibratura, esclusivamente in discordanza (in concordanza la meccanica di formazione è di tipo misto o di tipo E3), ad esclusivo interesse del legno di densità medio alta e ad elevata rigidità⁹. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra -10° a -70°. Il difetto conseguente è la ‘fibra strappata’ (Fig. 5.10).

Questa meccanica si manifesta quando la reazione alla sollecitazione esercitata dal coltello è a carico esclusivo del legno primaverile o del legno estivo, senza che tra i due ci sia interazione. In questo caso le fratture che si formano nel sollevamento del materiale si propagano nella direzione della fibratura in corrispondenza di punti di debolezza, dopo di che si ha la rottura per flessione, generalmente al di sotto della superficie teorica, e l’asportazione del materiale. Si forma nel legno a densità elevata perché altrimenti si andrebbe incontro a deformazioni plastiche anziché alla propagazione della frattura. Questo tipo di strappo difficilmente raggiunge profondità elevate, in quanto le fibre sono sostenute dagli strati superiori, e la frattura non riesce a propagarsi in profondità.

“Tipo E2”, per distacco di materia a trazione trasversale prevalente e rottura a flessione (di tipo eterogeneo) - ‘fibra strappata’

Questa meccanica si realizza lavorando controfilo, ad angoli bassi, medi e alti della fibratura, esclusivamente in discordanza, per legni eterogenei, e deriva da un’interazione durante il taglio tra

⁸La stessa lavorazione eseguita in concordanza dà vita al problema della fibra embriciata, descritta rispettivamente dalle meccaniche E3 e G1

⁹Con questo si intende il legno estivo nelle conifere a forte differenza di densità, oppure anche il legno primaverile nelle specie in cui sia sufficientemente denso da causare questo difetto.

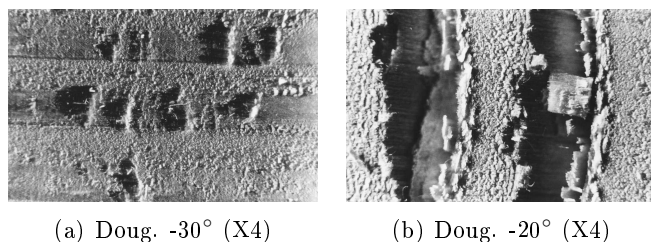


Figura 5.10: ‘Fibre strappate’ di tipo omogeneo (E1) ed eterogeneo (E2) su legno di douglasia. Si noti come in (a) gli strappi siano esclusivamente a carico del legno estivo senza interazione col legno primaverile mentre in (b) anche se sempre a carico del legno estivo, il primaverile giochi un ruolo importante nella meccanica di formazione — Fibres arrachées de type homogène (a), et hétérogène (b). [Foto Goli]

il legno primaverile e l’estivo. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra -10° e -70° . Il difetto conseguente è la ‘fibra strappata’ (Fig. 5.10).

Questa meccanica si manifesta su superfici radiali quando il legno estivo, inframezzato a due strati di legno primaverile, non è in grado di sostenere autonomamente la forza esercitata dal tagliente. L’estivo, che tende ad essere sollevato perché la lavorazione è svolta controfilo, non trova sostegno meccanico né nel legno primaverile sottostante né in quello soprastante. Infatti, il legno primaverile è troppo incoerente per resistere sia ad una forte sollecitazione a trazione che ad una a compressione. Il legno estivo viene dunque sollevato comprimendo il legno primaverile retrostante, si rompe in profondità per flessione, dopo di che viene strappato via. Questa interazione origina strappi di grosse dimensioni perché agisce a profondità elevate. Il distacco spesso non è ad esclusivo carico del legno estivo, ma nel sollevamento sono strappate anche porzioni del legno primaverile.

“Tipo E3”, per distacco di materia a trazione trasversale prevalente e rottura a flessione ‘fibra embriciata strappata’

Questa meccanica si realizza lavorando controfilo, per angoli bassi della fibratura, esclusivamente in concordanza, ed interessa esclusivamente il legno estivo per le specie a forte eterogeneità o sia il legno primaverile che l’estivo nelle specie omogenee e a maggior densità. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra -10° e -20° . Il difetto conseguente è la ‘fibra embriciata’, che in questo caso si definisce ‘strappata’ (Fig. 5.11).

Lavorando in concordanza, le meccaniche di taglio non possono interessare che porzioni di legno limitate alla dimensione del singolo truciolo: infatti, in tale lavorazione il coltello esercita la forza principale in direzione della superficie già lavorata. Inoltre il taglio inizia con moto discendente dal lato più spesso del truciolo. Questo fa sì che il coltello, una volta penetrato, eserciti una forte trazione trasversale

provocando il sollevamento della lamella determinatasi nell’impatto. Al sollevamento della lamella corrisponde la propagazione di una frattura nella direzione della fibratura (lungo il piano di debolezza del legno), fessura che si propagherà con tanta più facilità e tanto più profondamente quanto più è denso il legno e quanto maggiore è la tendenza della specie a rompersi per spacco. Le lamelle sollevate vengono quindi trascinate una dietro l’altra dal moto del coltello nella direzione opposta a quella della fibratura. In questa operazione si ha la rottura per flessione alla base della lamella. Questa meccanica è alla base della formazione delle fibre embriciate; il fatto che la lamella sia poi strappata o meno le divide in due tipi e due meccaniche di origine. Il Tipo E3, chiamato anche ‘fibre embriciate strappate’ è caratterizzato dallo strappo delle lamelle durante il taglio e fa quindi parte delle meccaniche “per distacco di materia”. Per bassi angoli della fibratura, infatti la fessura conseguente l’impatto non si propaga molto sotto la superficie, e le lamelle, molto corte e il cui fulcro di rotazione è vicino al centro dell’utensile, vengono strappate durante il taglio. Tale meccanica ha molti legami con la ‘fibra strappata’, anche se, a testimonianza della sua diversa formazione rimane una superficie scalettata per lo strappo in successione di singole lamelle.

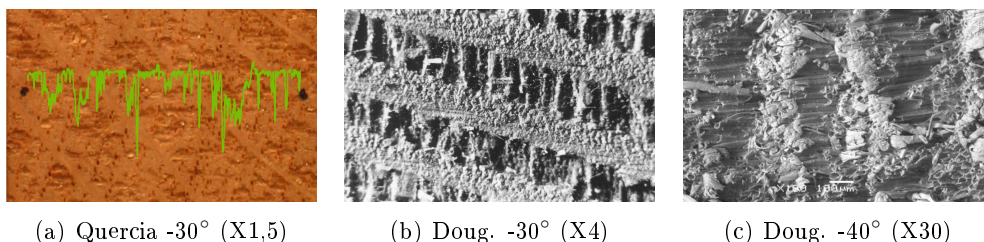


Figura 5.11: ‘Fibre embriciate’ strappate di Tipo E3 su quercia (a) e douglasia (b, c). In (a) è ben visibile il distacco di materia rispetto alla superficie teorica. Si noti a maggiore ingrandimento (b) come sia chiara la successione di asportazione delle lamelle e la modalità di rottura (c) — Fibres retournées de type arrachées sur du chêne (a) et du douglas (b, c). [Foto Goli]

Meccanica F: si realizza per distacco di materia a compressione trasversale prevalente e rottura a trazione longitudinale, e al suo interno si distingue il “Tipo F1” e il “Tipo F2”, a seconda che l’asportazione avvenga per scivolamento del materiale lungo il piano di debolezza delle fibre dopo la rottura, o che tale piano sia troppo inclinato per permetterne lo scivolamento e quindi la compressione trasversale sul materiale sia seguita dalla sua asportazione per strappo profondo e trazione.

“Tipo F1”: per distacco di materia a compressione trasversale prevalente e rottura a trazione longitudinale - “strappo per sfilamento”

Questa meccanica si realizza lavorando esclusivamente nel senso del filo, ad angoli della fibratura medio-bassi, sia in

discordanza che in concordanza, ad esclusivo interesse del legno a bassa densità ed elevata plasticità. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra 10° e 50° , specialmente lavorando in concordanza a causa della maggiore compressione esercitata dal movimento discendente dell'utensile durante il taglio. Il difetto conseguente è la 'fibra strappata' (Fig. 5.12).

Questa meccanica si realizza principalmente sul legno primaverile lavorando nel senso del filo ad angoli della fibratura medio-bassi. In questo tipo di lavorazione le fibre hanno difficoltà ad essere tagliate, ma tendono piuttosto a subire una compressione trasversale che se per il legno estivo non rappresenta un problema, in quanto ampiamente capace di sostenersi, nel legno primaverile questo causa cedimenti importanti. Infatti gruppi di fibre compresse tendono ad essere spinti in avanti dal coltello fino a che non si abbia una rottura per trazione longitudinale ed uno sfilamento delle fibre lungo il piano della fibratura (taglio longitudinale). Il piano della fibratura diventa quello di scivolamento perché rappresenta il piano di debolezza del legno. Le fibre vengono quindi "sfilate" lasciando sulla superficie una nicchia.

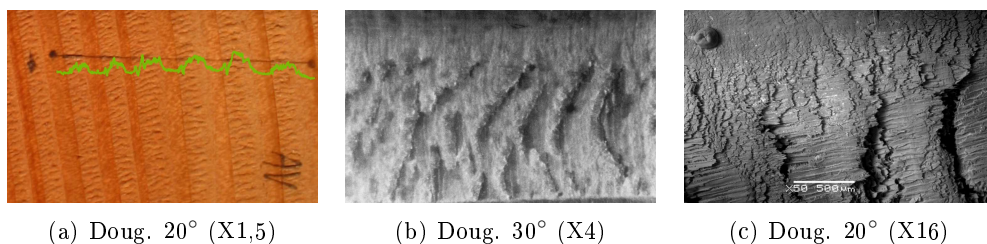


Figura 5.12: Fibre sfilate su douglasia. Si osserva chiaramente in (a) l'insieme delle nicchie da strappo nonché la contemporanea presenza del 'legno primaverile sporgente'. A maggiore ingrandimento (b) risulta chiaro lo sfilamento dei fasci di fibre e la loro rottura a trazione longitudinale e la presenza di nicchie di sfilamento (c) — Fibres arrachées par glissement sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli]

“Tipo F2”: per asportazione di materia a compressione trasversale prevalente e rottura a trazione longitudinale - “strappi primaverili profondi”

Questa meccanica si realizza lavorando esclusivamente nel senso del filo, ad angoli medio-alti della fibratura, sia in discordanza che in concordanza, ad esclusivo interesse del legno a bassa densità ed elevata plasticità. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra 60° e 90° e -60° e -90° , con un'intensità massima a 90° . Il difetto conseguente è la 'fibra strappata'. Si presenta con due varianti a seconda che la lavorazione sia eseguita in discordanza oppure in concordanza (Fig. 5.13 e 5.14).

Questa meccanica di formazione è assai simile alla precedente, ma la maggiore inclinazione delle fibre impedisce lo scivolamento e comporta uno strappo più profondo. A seguito del mancato taglio infatti, le fibre vengono compresse lateralmente fino a quando grossi gruppi di fibre non sono strappati via. Si presenta con due varianti a seconda che la lavorazione sia eseguita in discordanza o in concordanza:

- *var. 1: lavorando in discordanza.* La traiettoria ascendente del coltello e la compressione laterale esercitata sul legno primaverile, cedevole e poco coerente, provoca strappi profondi. Il legno primaverile infatti si deforma sul ferro tagliente per compressione trasversale e poi viene strappato quasi integralmente. Per questa ragione l'aspetto è di ‘strappi primaverili profondi’ (vedi Fig. 5.13)

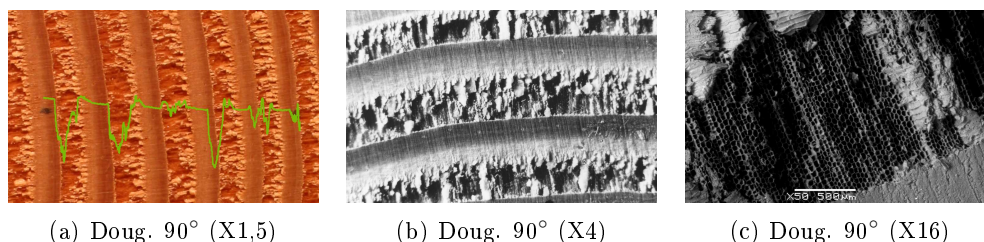


Figura 5.13: ‘Strappi primaverili profondi’ di tipo F2 var. 1 su douglasia. Si noti come il legno primaverile sia quasi interamente strappato, mentre l'estivo non presenti particolari problemi — Arrachements profonds dans le bois de printemps type F1 var. 1 sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli]

- *var. 2: lavorando in concordanza.* La traiettoria discendente del coltello fa sì che il materiale, che cede a compressione trasversale non sia integralmente strappato ma prima della compressione venga schiacciato restando in loco. Nonostante questo, risulta chiaro che il materiale è rotto e separato dalla superficie (vedi Fig. 5.14).

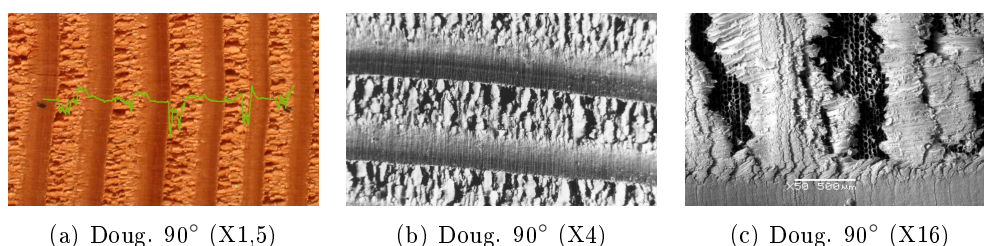


Figura 5.14: ‘Strappi primaverili profondi’ di tipo F2 var. 2 su douglasia. Si noti come il legno primaverile, anche se presente, sia rotto e separato dalla superficie — Arrachements profonds dans le bois de printemps type F1 var. 2 sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli]

In modalità mista

Questa “meccanica principale” è all’origine di un’unica problematica superficiale: la “fibra embriciata” così detta ‘incombente’. Avviene in modalità intermedia tra le due precedentemente individuate, perché alcuni elementi rimangono attaccati alla superficie, mentre altri ne sono strappati via. Ne fa parte esclusivamente il tipo G.

Meccanica G: Si realizza in modalità mista a trazione trasversale prevalente e rottura a flessione, e al suo interno si distingue soltanto il ‘Tipo G1’. La meccanica iniziale è uguale ad E3 ma le lamelle anziché venire strappate restano in parte attaccate alla superficie. Il difetto si forma lavorando esclusivamente controfilo con tecnologia concorde¹⁰.

“Tipo G1”, in modalità mista a trazione trasversale prevalente e rottura a flessione ‘fibre embriciate incombenti’

Questa meccanica si realizza lavorando controfilo, per angoli medio-alti della fibratura, esclusivamente in concordanza, ed interessa esclusivamente il legno estivo per le specie a forte eterogeneità o sia il legno primaverile che l’estivo nelle specie omogenee e a maggior densità. Si manifesta per angoli della fibratura compresi tra -30° e -80° . Il difetto conseguente è la ‘fibra embriciata’, che in questo caso si definisce ‘incombente’ (Fig. 5.15).

La meccanica di formazione nella fase iniziale è uguale alla meccanica già descritta in E3 per la “fibra embriciata strappata” (vedi par. 5.3.2, p. 58). Durante il suo moto discendente l’utensile, lavorando in concordanza, esegue un’incisione sulla superficie, e continuando la rotazione trascina dietro di sé singole lamelle che si rompono per flessione. Tali lamelle, contrariamente a quello che succede per la meccanica E3 non sono strappate via, ma restano in gran parte attaccate alla superficie per un’estremità. L’altra estremità viene trascinata in direzione opposta a quella della fibratura, a causa della maggiore inclinazione della fibratura. La fessura derivante dalla trazione si propaga molto in profondità e questo porta alla formazione di lamelle abbastanza lunghe da essere trascinate senza essere rotte. Per angoli medi della fibratura ancora molte lamelle sono asportate, anche se molte rimangono incombenti sulla superficie, ed all’aumentare dell’angolo aumenta il numero di lamelle incombenti. A 90° tale fenomeno si verifica solo in alcuni casi ed in maniera abbastanza blanda, perché le fibre verticali hanno una forte coerenza e tendono a non cedere alla sollecitazione laterale. Raggiunge la sua intensità massima tra i 70° e gli 80° .

¹⁰ Questa meccanica, assieme alla E3, rappresenta per la lavorazione in concordanza, quello che in discordanza rappresentano le meccaniche di tipo E1 ed E2.

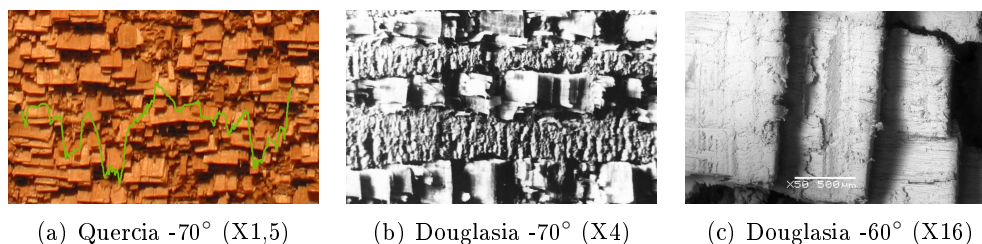


Figura 5.15: ‘Fibre embriciate’ incumbenti di tipo G1 su quercia (a) e douglasia (b, c). Si noti in (a) come molte lamelle siano comunque strappate, classificando la meccanica come ‘modalità mista’. In (b) si noti come tale meccanica sia a carico del legno più denso, e quindi in questo caso ad esclusivo carico del legno estivo, mentre il primaverile non ne risulta affetto. Si noti infine come in (c) sia ancora ben visibile il segno della compressione del coltello che determina la lamella e ne causa il sollevamento — Fibres retournées de type non arrachées type G1 sur du douglas observé à petit (a), moyen (b) et fort grossissement (c). [Foto Goli]

Origine meccanica	Sottomeccanica	Rottura/Cedimento	Tipo
Spostamento di materia	Traz. Trasv.	e cedimento parziale	A1(var. 1,2)
		e cedimento plastico	B1
	Comp. Trasv.	e cedimento elastico	C1, C2
		e cedimento plastico	D1, D2
Distacco di materia	Traz. Trasv.	rottura a flessione	E1, E2, E3
	Comp. Trasv.	rottura a trazione	F1, F2(var. 1,2)
Mod. Mista	Traz. Trasv.	rottura a flessione	G1

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva delle ‘meccaniche ibride’ — Tableau des mécaniques hybrides.

Tipo	Descrizione	Difetto qualitativo
A1 (var. 1 e 2)	Fibre sollevate	Fibra lanuginosa
B1	Fibre sollevate e schiacciate	Fibra schiacciata
C1	Estroflessione del legno primaverile	Legno prim. sporg.
C2	Bordo vaso sporgente	Vasi uncinati
D1	Fibre spostate lateralmente	Fibra rialzata
D2	Fibre compresse lateralmente	Fibre pettinate - Eff. lucido
E1	Fibre strappate di tipo omogeneo	Fibra strappata
E2	Fibre strappate di tipo eterogeneo	Fibra strappata
E3	Fibre embriciate strappate	Fibra embriciata
F1	Strappo per sfilamento	Fibra strappata
F2 (var. 1 e 2)	Strappi primaverili profondi	Fibra strappata
G1	Fibre embriciate incumbenti	Fibra embriciata

Tabella 5.2: Tabella riassuntiva delle ‘meccaniche ibride’ e dei relativi stati conseguenti — Tableau des mécaniques hybrides et des états induits.

Tipo	Densità Legno	Lavorazione	Sollecitazioni	Angolo (°)
A1 (var. 1)	Bassa	Disc.	TT/F/PP	-10/-30
A1 (var. 2)	Bassa	Conc.	TT/F/PP	-10/-30
B1	Indifferente	Conc./Disc.	TT/F/CT	-30/-90
C1	Eterogeneo	Conc./Disc.	CT/PE	10/50
C2	Vasi grandi	Conc./Disc.	CT/PE	10/30
D1	Eterogeneo	Conc./Disc.	CT/PP	30/70
D2	Indifferente	Conc./Disc.	CT/PP	10/80
E1	Medio-alta	Disc.	TT/F	-10/-70
E2	Medio-alta	Disc.	TT/F	-10/-70
E3	Medio-alta	Conc.	TT/F	-10/-20
F1	Bassa	Conc./Disc.	CT/TL/TaL	10/50
F2 (var. 1)	Bassa	Disc.	CT/TL/TaT	-60/-90 60/90
F2 (var. 2)	Bassa	Conc.	CL/CT	-60/-90 60/90
G1	Medio-alta	Conc.	TT/F	-30/-80

Tabella 5.3: Tabella indicante la meccanica di formazione, il tipo di legno in cui preferenzialmente si forma, il tipo di lavorazione, le sollecitazioni ritenute fondamentali per lo sviluppo del difetto e gli angoli tipici a cui per umidità normale, o prossima ad essa è possibile riscontrare il difetto. CT: compressione trasversale, TT: trazione trasversale, F: flessione, TL: trazione longitudinale, TaL: taglio longitudinale, CL: compressione longitudinale, TaT: taglio trasversale, PP: processi plastici, PE: processi elastici — Tableau des mécaniques.

Qualité de la surface usinée et mécanique de formation des surfaces

Mécaniques et “états induits”

Pour chaque mécanique de formation, on peut décrire l'état de surface induit. Nous proposons ici une analyse de chaque mécanique de formation des défauts et de leurs conséquences sur la surface usinée.

Mécanique par coupe prédominante

Cette modalité de coupe correspond à une surface usinée de très bonne qualité.

Mécanique hybride

A cette modalité de coupe correspond la formation de plusieurs endommagements sur la surface usinée. L'état final de la surface est en général mauvais.

Déplacement de matière:

4 mécaniques secondaires (dont deux variantes pour la mécanique A1), A1 (var. 1 et var. 2), B1, C1, D1 et D2. Les défauts qui correspondent à cette mécanique sont les surfaces pelucheuses, les fibres comprimées, les fibres soulevées, le bois de printemps proéminent, les vaisseaux rappeurs, l'effet mat, l'effet brillant.

Réaction en traction transversale

- *endommagement partiel (type A1 var. 1 et 2), ou surfaces pelucheuses dans les deux variantes 1 et 2 si l'usinage se fait dans le sens du fil ou à contre-fil.*
- *endommagement plastique (type B1) : fibres comprimées et effet mat*

Réaction en compression

- *endommagement élastique (type C1, C2) : bois de printemps proéminent et vaisseaux rappeurs*
- *endommagement plastique (type D1, D2) : fibres soulevées et effet brillant*

Détachement de matière:

5 mécaniques différentes, $E1$, $E2$, $E3$, $F1$, $F2$. Les défauts qui appartiennent à ces configurations sont les fibres arrachées, les fibres retournées.

Réaction en traction transversale

- rupture en flexion (type $E1$, $E2$, $E3$) : fibres arrachées de type homogène, fibres arrachées de type hétérogène, fibres retournées de type arrachées.

Réaction en compression

- rupture en traction longitudinale (type $F1$, $F2$ var. 1 e 2) : fibres arrachées par glissement, arrachements profonds dans le bois de printemps.

Modalité mixte:

Just un type de réaction et un type de rupture:

Réaction en traction transversale

- rupture en flexion (type $G1$), ou fibres retournées de type non arrachées.

Capitolo 6

Qualità finale ed angolo della fibratura

Sommario: Gli stati finali delle superfici lavorate con scopo di finitura per mezzo di utensile rotante variano sensibilmente al variare dell'angolo della fibratura rispetto al piano di lavorazione. Si sono eseguite delle lavorazioni con una variazione angolare progressiva di 10° su 180° totali al fine di classificare l'evoluzione delle superfici al variare dell'angolo della fibratura.

6.1 Introduzione

Se da un lato è importante comprendere le meccaniche di formazione delle superfici, dall'altro è estremamente opportuno sistematizzarle come evoluzione successiva vista in funzione dell'angolo della fibratura. Nella trattazione che segue si cercherà di descrivere l'evoluzione delle superfici al variare dell'angolo della fibratura, ed in particolare partendo da una lavorazione a filo dritto descriveremo l'evolvere dei difetti per douglasia, rovere e faggio, nel senso del filo e controfilo, fino ad arrivare alla lavorazione di testa.

6.2 Materiali e metodi

Al fine di determinare la qualità finale di alcune specie legnose al variare dell'angolo della fibratura si è proceduto alla lavorazione di douglasia, rovere e faggio con diversi angoli della fibratura, lavorando nel senso del filo e controfilo, sia in concordanza che in discordanza. Si sono segati provini da legname con fibratura regolare e si è provveduto alla lavorazione superficiale con le attrezzature ed i parametri indicati in tab. 6.1 e tab. 6.2. Si è scelto di lavorare una conifera e due latifoglie per vedere le differenti reazioni di un legno a forte eterogeneità come la douglasia, di uno a densità media più elevata e minore eterogeneità come la quercia e di uno assai omogeneo, denso e facilmente lavorabile come il faggio. Si è scelta la douglasia perché per le sue caratteristiche ha una grossa capacità di amplificare i difetti, si è scelto la quercia perché è uno dei legni più comunemente lavorati ed il faggio perché facilmente lavorabile. Il tipo di provino scelto è orientato tangenzialmente, e se ne lavora la faccia radiale, in modo che il coltello

eserciti le sollecitazioni ad esclusivo carico del legno primaverile o estivo così da evitare interazioni tra i due. Naturalmente essendo l'albero di forma cilindrica non esistono provini perfettamente tangenziali (almeno per le dimensioni dei provini richiesti) e quindi una leggera curvatura degli anelli sarà inevitabile e sempre più visibile all'aumentare dell'angolo della fibratura, raggiungendo il massimo nella superficie di testa. La scelta dei parametri di lavorazione è stata "esperienziale", si sono cioè svolti numerosi test per determinare con il materiale a nostra disposizione quali fossero i parametri più corretti e che integrassero velocità di lavorazione e qualità finale. Tali parametri sono stati fissati come in tab. 6.2. Si è scelto un utensile con placchette carburo intercambiabili, che oltre ad essere uno dei materiali più usati in assoluto ci avrebbe permesso di avere in maniera relativamente semplice sempre lo stesso grado di affilatura. Per quanto riguarda la variazione dell'angolo della fibratura si è proceduto per segagione successiva di porzioni di legno dallo stesso pezzo per accrescere l'angolo di 10° in 10° . I provini non avevano una misura standard, perché si è voluto utilizzare sempre lo stesso pezzo di legno per garantire che le condizioni del materiale fossero le stesse e si è avuto bisogno di porzioni a fibratura estremamente regolare ogni pezzo variava in dimensione. Per ogni lavorazione, eseguite ad una profondità di 0,5 mm si eseguiva prima un'operazione di messa in piano della superficie, si eseguivano cioè 10 passaggi ad una profondità di 0,1 mm per limitare i danni alle superfici ed ottenere una superficie di riferimento in partenza. Dopo la calibrazione si eseguiva quindi il passaggio vero ad una profondità di 0,5 mm. Rigitando il pezzo di legno su se stesso si otteneva un'inversione della direzione della fibratura e si poteva lavorare nel senso del filo e controfilo, esattamente lo stesso legno e ad una distanza di 1,5 mm dalla passata precedente. Le prove sono state eseguite tutte nel minore spazio possibile per limitare al massimo la variabilità del materiale. Ogni pezzo è stato lavorato per metà con tecnica concorde e per metà con tecnica discorde, in modo da eseguire le due lavorazioni esattamente sullo stesso materiale e al fine di poter comparare le due lavorazioni in maniera molto immediata e semplice 6.2.

Fixed Parameters
Milling machine: 3 axes CNC router
Wood species: Oak, Douglas Fir
Moisture content: Oak :12,5 % Douglas Fir : 11%
Average specific gravity: Oak: 0,66 g/cm ³ Douglas Fir: 0,45 g/cm ³
Rake angle (α): 20°
Clearance angle (β): 15°
Knives mounted on the cutting head: 2
Knives material: tungsten carbide screwed inserts (HW)
Cutting head diameter: 40 mm
Specimen section: tangential, processed in the radial face

Tabella 6.1: Materiali usati per eseguire le lavorazioni — Matériau utilisées dans les tests.

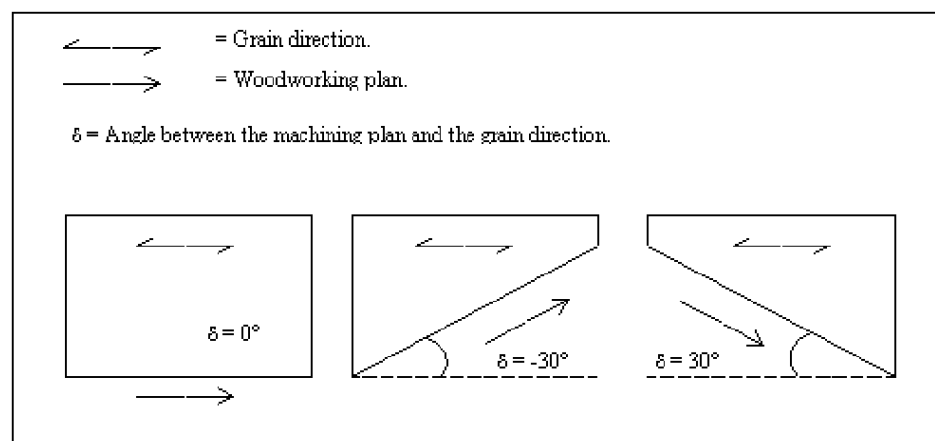


Figura 6.1: Schema del metodo utilizzato per la variazione dell'angolo della fibratura nella lavorazione. Si esegue il taglio all'angolo della fibratura desiderato, dopo di che ruotando il pezzo su se stesso si lavora la stessa superficie “nel senso del filo” e “controfilo”. — Méthode utilisée pour faire varier l'angle du fil dans l'usinage des surfaces. On coupe avec l'angle du fil souhaité et après on tourne la pièce sur elle même pour usiner la même surface “dans le sens du fil” et “contrefil” [Schema Goli]

Variables
Cutting length: 80 mm
Cutting height: 30 mm
Cutting depth: 0,5 mm
Feeding speed: 5 m/min
Rotation speed: 13867 Rev./min
Cutting technique: down-milling, up-milling
Processing: along the grain direction - against the grain direction

Tabella 6.2: Parametri impostati per l'esecuzione delle prove — Paramètres d'usage.

6.3 Stato delle superfici e loro evoluzione

Ogni pezzo è stato lavorato per metà con tecnica discorde e per metà con tecnica concorde. Di seguito si riportano delle immagini delle superfici lavorate, iniziando dalla douglasia e continuando con la rovere ed il faggio. Sulla stessa linea sono riportati due pezzi: hanno entrambi la stessa angolazione della fibratura e la differenza risiede nel fatto che il pezzo a sinistra è lavorato nel senso del filo, mentre quello sulla destra controfilo. Ogni pezzo lavorato presenta due metà, nella metà sinistra la lavorazione è stata eseguita in discordanza, nella metà destra la lavorazione è stata eseguita in concordanza. La parte di divisione rappresenta la zona di formazione del truciolo che può essere assai interessante da analizzare. Esistono due pezzi 0° (0° e -0°) e due pezzi 90° (90° e -90°) perché nell'esecuzione della lavorazione si è rigirato il pezzo su se stesso dimostrando che le due superfici fossero uguali e quindi che la fibratura fosse ben perpendicolare o parallela al piano di lavorazione, nonché che lavorando con gli stessi parametri di lavorazione e lo stesso angolo della fibratura un campione

con certe caratteristiche si ottiene lo stesso risultato.

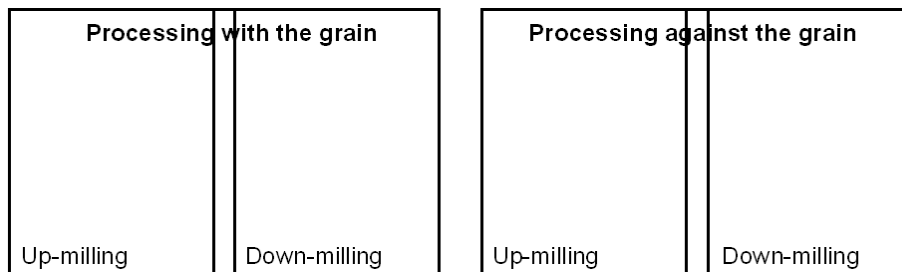


Figura 6.2: Schema di riferimento per la lettura delle figure a seguire — Schéma pour le repérage des figures qui suivent. [Schema Goli]

6.4 Douglasia (*Pseudotsuga menziesii* Franco var. *Menziesii*)

La Douglasia, come tutti sanno è un pregiatissimo legno dalle nobili caratteristiche tecnologiche: elevate resistenze meccaniche, forte durabilità naturale, bell'aspetto, scarsa nervosità. Ciononostante, la douglasia dei luoghi di origine e sviluppo della specie (Stati Uniti e Canada) ha caratteristiche essenzialmente diverse da quella cresciuta in Europa. Una prima caratteristica fondamentale è rappresentata dalle dimensioni degli anelli di accrescimento. Specie a crescita rapida nei nostri climi, presenta tutti gli inconvenienti legati a questo tipo di sviluppo, a partire dall'elevato spessore dell'anello e dall'enorme differenza densitometrica al suo interno. Si è scelta questa specie perché in Borgogna rappresenta una risorsa importante e perché viste le sue caratteristiche di eterogeneità e spessore dell'anello, accentua in maniera particolare i difetti rendendo maggiormente visibili i processi.

6.4.1 Descrizione

Lavorando nel senso del filo in discordanza

Si inizia la descrizione dalla lavorazione a filo dritto prendendo in esame tutte le superfici ottenute lavorando nel senso del filo fino alla lavorazione di in testa. 0° - si noti (Fig. 6.3(a), 6.4(a) e successive) come il taglio sia preciso e netto e la scissione sia avvenuta per taglio. Da questo stato aumentando l'angolo della fibratura si ha un netto e progressivo peggioramento della qualità della superficie. Per un angolo di 10° si nota già un vero e proprio 'effetto lucido' sul legno estivo, mentre sul legno primaverile sono già visibili degli 'strappi per sfilamento' anche se molto leggeri. Aumentando l'angolo a 20° si nota un aggravamento dei fenomeni in atto e si inizia percepire la compressione in atto sugli elementi cellulari. Gli 'strappi per sfilamento' diventano più importanti e visibili, riguardando tutta la superficie. Per la superficie ottenuta lavorando

a 30° si osserva chiaramente una compressione più importante (a 20° si ha la perpendicolarità tra la faccia di attacco e la fibratura e l'angolo tra le due è inferiore a 90° , rendendo più difficile il taglio), quindi un marcato effetto lucido sul legno estivo e gli 'strappi per sfilamento' sul primaverile. Per 40° e 50° le dinamiche sono molto simili alle precedenti anche se più gravi. Gli elementi del legno primaverile cominciano infatti ad essere sufficientemente verticali da causare la formazione degli 'strappi primaverili profondi'. Il passaggio a questi avviene in maniera più o meno graduale fino a 60° , dove gli 'strappi per sfilamento' cessano di essere presenti. Nel legno ad alta densità non si hanno invece particolari difetti a parte un marcato 'effetto lucido'. Aumentando ancora l'angolo, per 70° e 80° la resistenza al taglio è tale che le meccaniche in atto si aggravano sul legno primaverile, anche se l'estivo si presenta sempre di buona qualità. Tali meccaniche trovano il loro massimo a 90° , dove il legno primaverile è quasi interamente strappato, per poi diminuire di intensità tornando a -80° (vedi Tab. 6.3).

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. lucido e strappi per sfil.
20°	eff. lucido e strappi per sfil.
30°	eff. lucido e strappi per sfil.
40°	strappi prim. prof.
50°	strappi prim. prof.
60°	strappi prim. prof.
70°	strappi prim. prof.
80°	strappi prim. prof.
90°	strappi prim. prof.

Tabella 6.3: Difetti presenti sulle superfici lavorando douglasia nel senso del filo ed in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant douglas dans le sens du fil en opposition avec des angles du fil différents.

Lavorando nel senso del filo in concordanza

La reazione del legno a questo tipo di lavorazione è molto simile a quella ottenuta lavorando in discordanza. Nonostante il moto discendente del tagliente infatti non si notano differenze significative, quindi resta valido quanto detto per la lavorazione eseguita in discordanza. Le uniche due differenze sensibili sono (si noti Fig. 6.3(a), 6.4(a)): la formazione a 10° di abbondanti 'strappi per sfilamento' e la sostituzione degli 'strappi primaverili profondi' var. 1, che tipicamente si forma lavorando in discordanza, con la var. 2, che tipicamente si forma lavorando in concordanza (vedi Tab. 6.4).

Lavorando controfilo in discordanza

Anche lavorando controfilo la descrizione inizia dalla lavorazione a filo dritto e prende in esame tutte le superfici ottenute lavorando controfilo fino alla lavo-

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. lucido e strappi per sfil.
20°	eff. lucido e strappi per sfil.
30°	eff. lucido e strappi per sfil.
40°	strappi prim. prof.
50°	strappi prim. prof.
60°	strappi prim. prof.
70°	strappi prim. prof.
80°	strappi prim. prof.
90°	strappi prim. prof.

Tabella 6.4: Difetti presenti sulle superfici lavorando douglasia nel senso del filo ed in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant du douglas dans le sens du fil en avalant avec des angles du fil différents.

razione di in testa: a 0° si noti (Fig. 6.3(b), 6.4(b) e successive) come il taglio sia preciso e netto e la scissione sia avvenuta per taglio. Da questo stato aumentando l'angolo della fibratura si ha un netto e progressivo peggioramento della qualità della superficie ed in molti casi assai più importante rispetto alla stessa lavorazione eseguita nel senso del filo. Per una angolo di -10° sul legno primaverile si nota che è molto diffuso il problema della 'fibra lanuginosa'. Aumentando l'angolo, a -20° questa inizia già a mutare verso la 'fibra schiacciata' e la superficie si presenta già come di bassa qualità. Per -30° si ha un leggero aggravamento della 'fibra schiacciata', che continua progressivamente sia per -40° che per -50°. Una svolta importante si ha a -60°, dove la 'fibra schiacciata' lascia il posto agli 'strappi primaverili profondi'. La qualità della superficie quindi fino a questo punto è costantemente peggiorata con il crescere dell'angolo della fibratura. Questo peggioramento della qualità procede anche in -70° ed in -80° fino a quando a -90° si raggiunge il massimo con l'asportazione quasi integrale del legno primaverile (vedi Tab. 6.5).

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
-10°	Fibra lanuginosa
-20°	Fibra lanuginosa, Fibra schiacciata
-30°	Fibra schiacciata
-40°	Fibra schiacciata
-50°	Fibra schiacciata
-60°	Strappi prim. prof.
-70°	Strappi prim. prof.
-80°	Strappi prim. prof.
-90°	Strappi prim. prof.

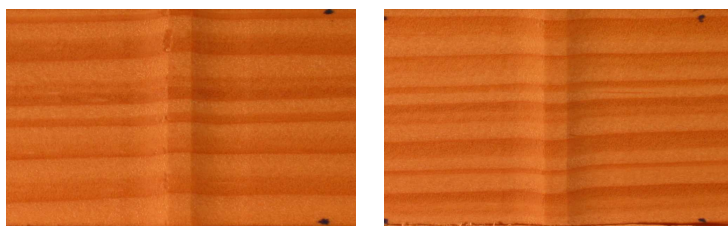
Tabella 6.5: Difetti presenti sulle superfici lavorando douglasia controfilo in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant du douglas contre fil en opposition avec des angles du fil différents.

Lavorando controfilo in concordanza

La lavorazione controfilo in concordanza pone problematiche assai diverse da quelle poste dalla lavorazione in discordanza. I difetti che si originano infatti sono fondamentalmente diversi, tanto che la ‘fibra embriciata’ si origina esclusivamente in concordanza, almeno quanto la ‘fibra strappata’ si origina esclusivamente in discordanza. Ma procediamo ad un’analisi progressiva. Nella lavorazione effettuata a 0° si noti (Fig. 6.3(b), 6.4(b) e successive) come il taglio sia preciso e netto e la scissione sia avvenuta per taglio. Da questo stato aumentando l’angolo della fibratura si ha un netto e progressivo peggioramento della qualità della superficie, che in questo caso risulta assai più difettata rispetto alle lavorazioni eseguite nel senso del filo ed anche alla lavorazione eseguita nel senso del filo con tecnologia discorde. Per -10° si osserva chiaramente il problema della ‘fibra lanuginosa’ che lavorando in concordanza è sotto forma di var. 2. Ad un angolo di -20° si ha ancora la manifestazione di ‘fibra lanuginosa’, che si presenta assieme a parti di ‘fibra schiacciata’. A -30° invece è la ‘fibra embriciata strappata’ che si manifesta in maniera ben visibile e che affligge quasi integralmente la superficie. Passando a -40° si ha un ritorno parziale alla ‘fibra pressata’, anche se rimangono ancora parti afflitte da ‘fibra embriciata strappata’. La ‘fibra embriciata strappata’ regredisce quindi completamente in -50° e -60° per lasciare il posto alla ‘fibra schiacciata’ a -60° , mentre a -70° si ha nuovamente la formazione di ‘fibra embriciata’, questa volta però nella sua forma ‘incombente’. Questo difetto riguarda esclusivamente il legno estivo che è più denso del primaverile. A -80° si ha ancora il manifestarsi di ‘fibra embriciata incombente’. A -90° infine si ha la manifestazione sul legno primaverile di ‘strappi primaverili profondi’ var. 2 (vedi Tab. 6.6).

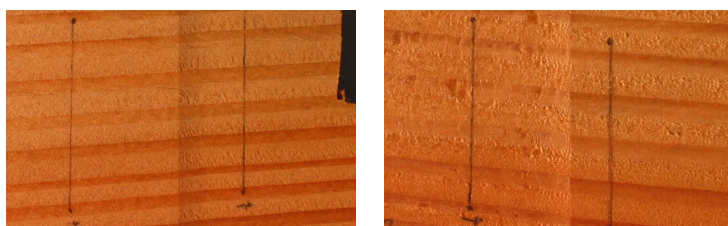
Grain angle	Defect
0°	Superficie ottima
-10°	Fibra lanuginosa
-20°	Fibra lanuginosa, Fibra schiacciata
-30°	Fibra embriciata strappata
-40°	Fibra embriciata strappata
-50°	Fibra schiacciata
-60°	Fibra schiacciata
-70°	Fibra embriciata incombente
-80°	Fibra embriciata incombente
-90°	Strappi prim. prof.

Tabella 6.6: Difetti presenti sulle superfici lavorando douglasia controfilo in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant du douglas contre fil en avalant avec des angles du fil différents.



(a) Douglasia Douglas 0° (X1,2) (b) Douglasia Douglas -0° (X1,2)

Figura 6.3: Le due superfici (a e b) sono uguali, a testimonianza che ripetendo il test dopo aver ruotato su se stesso il pezzo, cioè lavorando con lo stesso angolo della fibratura il risultato è lo stesso. La scissione in questo caso è avvenuta per ‘taglio prevalente’ — Est clair que la ‘séparation’ est par coupe ‘prédominante’. Les deux surfaces sont usinées après avoir retourné la pièce de 180° sur elle même, pour montrer que le fil est droit et que le résultat est répétable. [Foto Goli]



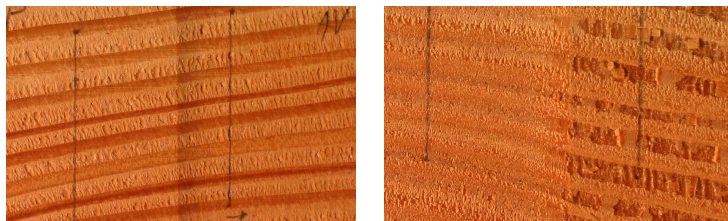
(a) Douglasia Douglas 10° (X1,2) (b) Douglasia Douglas -10° (X1,2)

Figura 6.4: Nel senso del filo (a): sul legno primaverile sono ben visibili ‘strappi per sfilamento’, che si presentano più intensi lavorando in concordanza. Controfilo (b) si osserva il problema della ‘fibra lanuginosa’ nella var. 1 lavorando in discordanza e nella var. 2 lavorando in concordanza — Le problème principal usinant dans le sens du fil est celui des ‘fibres arrachées par glissement’, qui sont plus importants usinant en avalant que en opposition. Contrefil le défaut principal est celui des ‘surfaces pelucheuses’ dans le deux variantes A et B usinant en opposition ou en avalant. [Foto Goli]



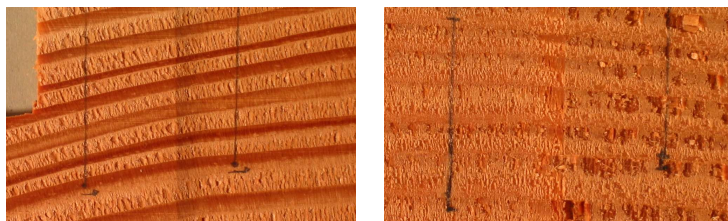
(a) Douglasia Douglas 20° (X1,2) (b) Douglasia Douglas -20° (X1,2)

Figura 6.5: Nel senso del filo (a): peggioramento della qualità ed aggravamento degli ‘strappi per sfilamento’, più intensi lavorando in concordanza. Controfilo (b): si passa alla ‘fibra pressata’, anche se si continua a vedere qualche ‘fibra lanuginosa’ sia nella var. 1 che nella var. 2 — La surface est caractérisé par les mêmes défauts que avant mais qui devient plus importants. [Foto Goli]



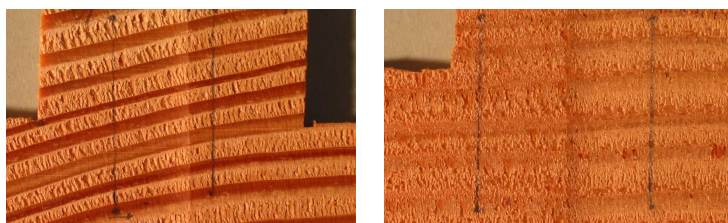
(a) Douglasia Douglas 30° (X1,2) (b) Douglasia Douglas -30° (X1,2)

Figura 6.6: Nel senso del filo (a): ancora peggioramento degli ‘strappi per sfilamento’ anche se la differenza qualitativa tra le superfici ottenute lavorando in ‘concordanza’ o in ‘discordanza’ si è ridotta. Controfilo (b): ben visibile la ‘fibra pressata’ lavorando in discordanza e la ‘fibra embriciata strappata’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil la surface est caractérisé par les mêmes défauts que avant mais qui devient plus importants. Contre fil sont bien visibles le défauts des ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et celui des ‘fibres retournées’ usinant en avalant. [Foto Goli]



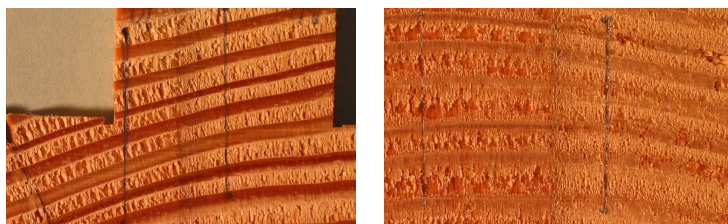
(a) Douglasia Douglas 40° (X1,2) (b) Douglasia Douglas -40° (X1,2)

Figura 6.7: Nel senso del filo (a): gli ‘strappi per sfilamento’ iniziano ad assumere la forma di ‘strappi primaverili profondi’. Il risultato è simile, lavorando in concordanza o in discordanza. Controfilo (b): si manifestano le ‘fibre schiacciate’ lavorando in discordanza e le ‘fibre embriciate strappate’ sul legno estivo e le ‘fibre schiacciate’ sul primaverile lavorando in concordanza. Le ‘fibre embriciate strappate’ risultano meno intense rispetto a quelle della superficie precedente — Encore des ‘fibres arrachées par glissement’ usinant dans le sens du fil en train de devenir des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contrefil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et ‘fibres retournées’ en avalant. [Foto Goli]



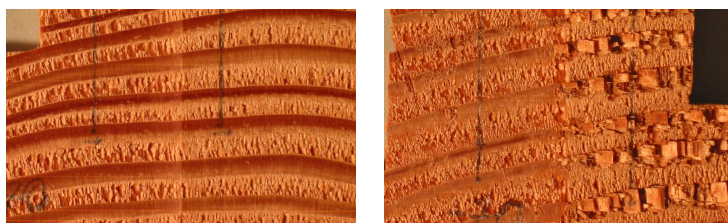
(a) Douglasia Douglas 50° (X1,2) (b) Douglasia Douglas -50° (X1,2)

Figura 6.8: Nel senso del filo (a): si converge sempre di più verso gli ‘strappi primaverili profondi’ tanto che si iniziano a distinguere la var. 1 e la var. 2. Controfilo (b): viene meno la ‘fibra embriciata’ e si ha una forte ‘fibra pressata’ per entrambe le lavorazioni — Douglas usinée en avalant et opposition à 50° et -50°. Dans le sens du fil ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ var. 1 et 2. Contrefil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et en avalant. [Foto Goli]



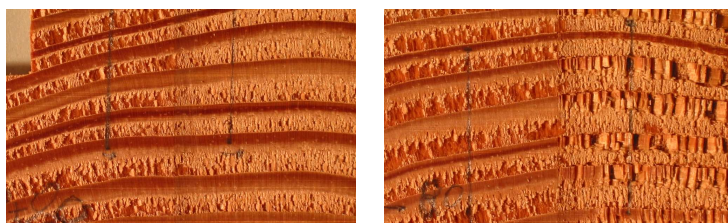
(a) *Douglasia Douglas* 60° (X1,2) (b) *Douglasia Douglas* -60° (X1,2)

Figura 6.9: Nel senso del filo (a): affermazione degli ‘strappi primaverili profondi’ nelle due varianti 1 e 2. Il legno estivo continua ad essere di buona qualità. Controfilo (b): inizia la manifestazione degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in discordanza, mentre in concordanza si ha ancora la ‘fibra pressata’, con qualche accenno alla ‘fibra embriciata’ — Dans le sens du fil ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ var. 1 et 2. Contrefil ‘fibres comprimées’ et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en opposition. ‘Fibres comprimées’ usinant en avalant. [Foto Goli]



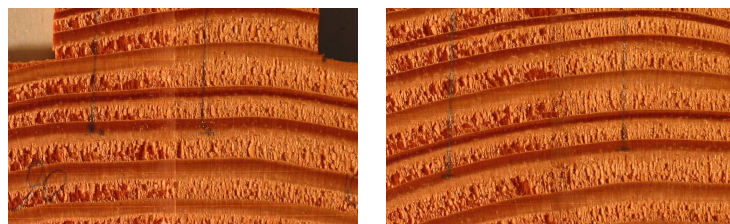
(a) *Douglasia Douglas* 70° (X1,2) (b) *Douglasia Douglas* -70° (X1,2)

Figura 6.10: Nel senso del filo (a): ‘strappi primaverili profondi’ nelle varianti 1 e 2 sul primaverile, l’estivo risulta di ottima qualità. Controfilo (b): affermazione degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in discordanza e della ‘fibra embriciata incombente’ (sul legno estivo) lavorando in concordanza. Sul primaverile, lavorando in concordanza si ha ancora la ‘fibra embriciata’ — Dans le sens du fil ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ dans les variantes 1 et 2. Contre fil formation des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en opposition et des ‘fibres retournées’ et des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en avalant. [Foto Goli]



(a) *Douglasia Douglas* 80° (X1,2) (b) *Douglasia Douglas* -80° (X1,2)

Figura 6.11: Nel senso del filo (a): ancora ‘strappi primaverili profondi’ var. 1 e 2 sul primaverile e legno estivo di buona qualità. Controfilo (b): ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in discordanza, mentre in concordanza ‘fibra embriciata incombente’ sul legno estivo e ‘fibra pressata’ sul primaverile — Dans le sens du fil ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ dans les variantes 1 et 2. Contre fil formation des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en opposition et des ‘fibres retournées’ et des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ usinant en avalant. [Foto Goli]



(a) Douglasia Douglas 90° (X1,2) (b) Douglasia Douglas -90° (X1,2)

Figura 6.12: Lavorazione di testa (a e b). I risultati ottenuti sono uguali lavorando la superficie in un senso e dopo averla rigirata su se stessa, a dimostrazione della ripetibilità del test. Presenti in tutti i casi gli ‘strappi primaverili profondi’ nelle varianti 1 e 2. Il legno estivo risulta di ottima finitura. Tendenza occasionale al manifestarsi di ‘fibre embriciate’ lavorando in concordanza — Le défaut principal est constitué par les ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. [Foto Goli]

6.4.2 Analisi comparata

Lavorando nel senso del filo e controfilo

Per terminare questa analisi è importante spendere qualche parola sulle differenti evoluzioni che si hanno lavorando nel senso del filo e controfilo. I relativi principi della reazione a trazione e a compressione sono già stati analizzati, in questa sede si procede semplicemente ad un’analisi comparata dei difetti presenti sulla superficie. La lavorazione effettuata a 0° è eseguita ‘a filo dritto’, quindi non esistono distinzioni, come per la ‘lavorazione in testa’. Con un’inclinazione di 10° e -10° si notano subito delle chiare differenze. Si vede chiaramente sul legno estivo la compressione eseguita sugli elementi cellulari lavorando ‘nel senso del filo’ e la trazione nella lavorazione eseguita ‘controfilo’. Un chiaro ‘effetto lucido’ (legno estivo) ed alcuni ‘strappi per sfilamento’ (legno primaverile) caratterizzano la superficie lavorata nel senso del filo, mentre un chiaro ‘effetto opaco’ (legno estivo) ed un’abbondante ‘fibra lanuginosa’ (legno primaverile) caratterizzano le superfici lavorate controfilo. Per angoli della fibratura di 20° e -20° si osserva un netto peggioramento delle superfici. Nel senso del filo si ha l’aggravamento degli ‘strappi per sfilamento’, mentre controfilo si ha la ‘fibra pressata’ o la ‘fibra lanuginosa’. L’evoluzione poi prosegue per aggravamento delle meccaniche già in atto. Lavorando nel senso del filo si ha una compressione che porta ad avere ‘strappi per sfilamento’ sul legno primaverile fino a 50° , angolo a cui saranno quasi del tutto sostituiti dagli ‘strappi primaverili profondi’, naturalmente nelle due differenti varianti (1 e 2) lavorando in concordanza e discordanza. Controfilo invece si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza, che si manifesta anche lavorando in concordanza anche se mista alla ‘fibra embriciata’. Controfilo evolve infine verso gli ‘strappi primaverili profondi’ rispettivamente nelle varianti 1 e 2 a seconda che si stia lavorando in concordanza o in discordanza. Le superfici infine convergono alla superficie ottenuta lavorando ‘in testa’.

6.5 Rovere (*Quercus petrea* (Matt.) Liebl)

La rovere come tutti sanno è un pregiatissimo legno dalle nobili caratteristiche tecnologiche. Elevate resistenze meccaniche, forte durabilità naturale, bell'aspetto, scarsa nervosità. Vista la sua diffusione in Francia e la facile reperibilità si è scelta questa specie come provino per le latifoglie. Prove preliminari svolte su tiglio, faggio e pioppo ci hanno indicato questa specie come la più adatta per l'esecuzione delle prove. Si procede di seguito ad una descrizione dell'evoluzione dei fenomeni all'aumentare dell'angolo della fibratura, lavorando sia in concordanza che in discordanza e nel senso del filo e controfilo.

6.5.1 Descrizione

Lavorando nel senso del filo in discordanza

Naturalmente la descrizione inizia dalla lavorazione a filo dritto e prende in esame tutte le superfici ottenute lavorando nel senso del filo fino alla lavorazione di in testa. Nella lavorazione effettuata a 0° si noti (Fig. 6.13(a), 6.14(a) e successive) come il taglio sia preciso e netto e la scissione sia avvenuta per taglio. Da questo stato, aumentando l'angolo della fibratura si ha un netto e progressivo peggioramento della qualità della superficie. Per un angolo di 10° ancora non si nota un vero e proprio 'effetto lucido' anche se la compressione già in atto sugli elementi cellulari, in alcuni casi (anche se non sistematicamente) porta alla formazione dei 'vasi uncinati'. Si noti anche la diversità estetica della superficie, anche se questa non è campo di analisi essendo una diversità estetica e rientrando quindi nelle 'peculiarità estetico-anatomiche'. Aumentando l'angolo a 20° si nota un aggravamento dei fenomeni in atto e si inizia percepire la compressione in atto sugli elementi cellulari. Il problema fondamentale è sempre quello dei 'vasi uncinati'. Arrivati a 30° quello che si osserva chiaramente è l'inizio di una compressione più importante (a 20° si ha la perpendicolarità tra la faccia di attacco e la fibratura ed ora l'angolo tra le due è inferiore a 90° rendendo più difficile il taglio), quindi un marcato effetto lucido sul legno estivo e le 'fibre pettinate' sul primaverile. Tale situazione rimane molto simile, anche se si aggrava a causa della maggiore compressione esercitata nel taglio, per le superfici successive. Per 40° e 50° le dinamiche sono molto simili alle precedenti dunque anche se più gravi. A partire da 60° la fibratura raggiunge un'inclinazione tale, ed oppone una tale resistenza al taglio che iniziano a svilupparsi i così detti 'strappi primaverili profondi'. Le parti a bassa densità attorno ai vasi tendono quindi a cedere a compressione trasversale e a trazione longitudinale ed essere strappate via. Aumentando ancora l'angolo, per 70° e 80° la resistenza al taglio è tale che le meccaniche in atto si aggravano sul legno primaverile, anche se l'estivo si presenta sempre di buona qualità. Tali meccaniche trovano il loro massimo a 90° per poi diminuire di intensità tornando a -80° .

Lavorando nel senso del filo in concordanza

La reazione del legno a questo tipo di lavorazione è molto simile a quella ottenuta lavorando in discordanza (si noti Fig. 6.13(a), 6.14(a)). Nonostante il moto

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. lucido
20°	eff. lucido e vasi uncinati
30°	eff. lucido e fibre pettinate
40°	eff. lucido e fibre pettinate
50°	eff. lucido e fibre pettinate
60°	strappi prim. prof.
70°	strappi prim. prof.
80°	strappi prim. prof.
90°	strappi prim. prof.

Tabella 6.7: Difetti presenti sulle superfici lavorando quercia nel senso del filo ed in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défaits typiques usinant du chêne dans le sens du fil en opposition avec des angles du fil différents.

discendente del tagliente infatti non si notano differenze significative, quindi resta valido quanto detto per la lavorazione eseguita in discordanza.

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. lucido
20°	eff. lucido e vasi uncinati
30°	eff. lucido e fibre pettinate
40°	eff. lucido e fibre pettinate
50°	eff. lucido e fibre pettinate
60°	strappi prim. prof.
70°	strappi prim. prof.
80°	strappi prim. prof.
90°	strappi prim. prof.

Tabella 6.8: Difetti presenti sulle superfici lavorando quercia nel senso del filo ed in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défaits typiques usinant du chêne dans le sens du fil en avalant avec des angles du fil différents.

Lavorando controfilo in discordanza

Anche lavorando controfilo la descrizione inizia dalla lavorazione a filo dritto e prende in esame tutte le superfici ottenute lavorando controfilo fino alla lavorazione di in testa. Nella lavorazione effettuata a 0° si noti (Fig. 6.13(b), 6.14(b) e successive) come il taglio sia preciso e netto e la scissione sia avvenuta per taglio. Da questo stato, aumentando l'angolo della fibratura si ha un netto e progressivo peggioramento della qualità della superficie ed in molti casi assai più importante rispetto alla stessa lavorazione eseguita nel senso del filo. Per un angolo di -10° ancora non si notano difetti, si comincia a percepire un'opacità della superficie, sintomo che i fenomeni di trazione e di cedimento sono già in atto. Per questo angolo anche se non si notano difetti importanti, l'unica cosa

riscontrabile sulla superficie è un diffuso effetto opaco. Aumentando l'angolo, a -20° si iniziano ad osservare fenomeni legati alla 'fibra strappata' (legno estivo) e ad alla 'fibra schiacciata' (legno primaverile) e la superficie si presenta già come di bassa qualità. Per -30° si ha un leggero aggravamento della 'fibra schiacciata', mentre la 'fibra strappata' già lieve nella precedente si riduce ulteriormente per andare a sparire. La superficie -40° rappresenta un punto di svolta importante: infatti gli elementi cellulari sono abbastanza verticali da resistere molto al taglio e non abbastanza resistenti da resistere alla compressione trasversale. La 'fibra schiacciata' diventa quindi assai importante e non più ad esclusivo carico del legno primaverile, ma anche dell'estivo, portando ad un netto peggioramento rispetto alle superfici precedentemente analizzate. Aumentando l'angolo si ha un peggioramento sia per -50° che per -60° . A questi valori di angolo della fibratura la 'fibra schiacciata' diventa ancora più importante e nel legno primaverile si verificano degli strappi ascrivibili agli 'strappi primaverili profondi'. La qualità della superficie quindi fino a questo punto è costantemente peggiorata con il crescere dell'angolo della fibratura. A -70° si assiste ad un cambiamento importante, che è il blocco di questo peggioramento, ed in alcuni casi ad una lieve diminuzione della 'fibra schiacciata' già presente. Questo si deve al fatto che ad un angolo di -70° corrisponde la perpendicolarità tra la fibratura e la faccia di attacco che modifica le meccaniche di taglio e rappresenta un punto di passaggio. Per -80° e -90° non si hanno poi grandi cambiamenti rispetto alla situazione analizzata in -70° .

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. opaco
20°	eff. opaco, fibra strapp. e schiacc.
30°	eff. opaco, fibra strapp. e schiacc.
40°	eff. opaco, fibra strapp.
50°	fibra schiacciata
60°	fibra schiacciata
70°	fibra schiacciata
80°	fibra schiacciata
90°	fibra schiacciata

Tabella 6.9: Difetti presenti sulle superfici lavorando quercia controfilo in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant du chêne contre fil en opposition avec des angles du fil différents.

Lavorando controfilo in concordanza

La lavorazione controfilo in concordanza pone problematiche assai diverse da quelle poste dalla lavorazione in discordanza. I difetti che si originano infatti sono fondamentalmente diversi, tanto che la 'fibra embriciata' si origina esclusivamente in concordanza, almeno quanto la 'fibra strappata' si origina esclusivamente in discordanza. Ma procediamo ad un'analisi progressiva. Nella lavorazione effettuata a 0° si noti (Fig. 6.13(b), 6.14(b) e successive) come il taglio sia

preciso e netto e la scissione sia avvenuta per taglio. Da questo stato, aumentando l'angolo della fibratura si ha un netto e progressivo peggioramento della qualità della superficie, che in questo caso risulta assai più difettata rispetto alle lavorazioni eseguite nel senso del filo ed anche alla lavorazione eseguita nel senso del filo con tecnologia discorde. Per -10° oltre al manifestarsi dell'«effetto opaco» si iniziano ad osservare dei microstrappi, che si aggravano intensamente a -20° , dove la «fibra embriciata strappata» si manifesta in maniera ben visibile. A -30° si osserva una questo difetto caratterizza l'integrità della superficie. Passando a -40° si inizia a vedere che le lamelle rigirate non sono sistematicamente strappate via ma iniziano a rimanere attaccate alla superficie e si passa quindi alla «fibra embriciata incombente». Anche se alcune lamelle sono strappate ed altre no, il difetto caratterizza la superficie in maniera integrale. L'aumento dell'angolo della fibratura da qui in poi, e cioè per -50° , -60° , -70° e -80° , è caratterizzato da un progressivo aumento della percentuale di «fibre embriciate incombenti» su quelle «strappate». A -90° infine il difetto si verifica talvolta ma non sistematicamente, e comunque in maniera meno grave, propagandosi meno in profondità. Dove la fibra embriciata non si verifichi viene sostituita dalle «fibre schiacciate».

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. opaco, fibra embr. strapp.
20°	eff. opaco, fibra embr. strapp.
30°	eff. opaco, fibra embr. strapp.
40°	fibra embr. incombente
50°	fibra embr. incombente
60°	fibra embr. incombente
70°	fibra embr. incombente
80°	fibra embr. incombente
90°	fibra schiacciata

Tabella 6.10: Difetti presenti sulle superfici lavorando rovere controfilo in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défaits typiques usinant du chêne contre fil en avalant avec des angles du fil différents.

6.5.2 Analisi comparata

Lavorando nel senso del filo e controfilo

Un'ulteriore analisi da eseguire sulle sezioni lavorate è quella che riguarda il paragone tra i risultati ottenuti lavorando nel senso del filo e controfilo con lo stesso angolo della fibratura. Le reazioni a trazione e compressione degli elementi sottostanti quelli in lavorazione sono stati già presi in esame, adesso si esegue un'analisi comparata dei risultati. La lavorazione effettuata a 0° è eseguita «a filo dritto», quindi non esistono distinzioni, come per la «lavorazione in testa». Con un'inclinazione di 10° e -10° si notano subito delle chiare differenze. La rovere è un legno duro, quindi le differenze sono meno marcate che sul legno di douglasia,

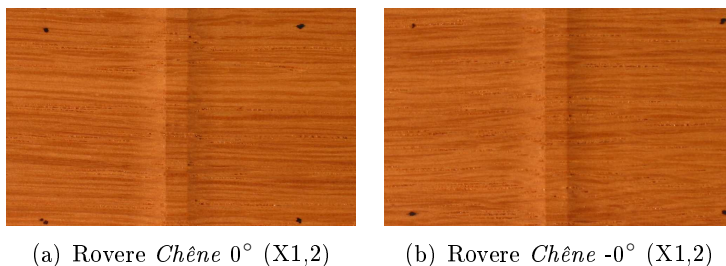


Figura 6.13: Le due superfici sono uguali (a e b), a testimonianza che ripetendo il test dopo aver ruotato su se stesso il pezzo, cioè lavorando con lo stesso angolo della fibratura il risultato è lo stesso. La scissione in questo caso è avvenuta per ‘taglio prevalente’ — Est clair que la séparation est par ‘coupe prédominante’. Les deux surfaces sont usinées après avoir retourné la pièce de 180° sur elle même, pour montrer que le fil est droit et que le résultat est répétable. [Foto Goli]

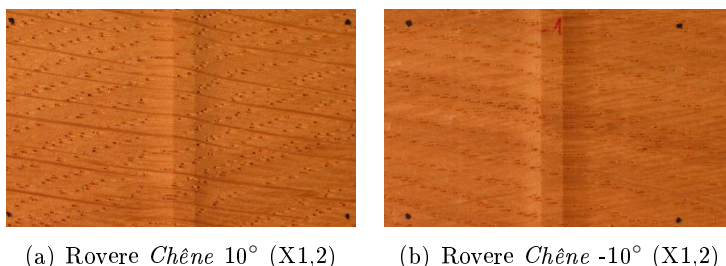


Figura 6.14: Nel senso del filo (a): si inizia a percepire il processo di compressione. Ancora non è un vero e proprio ‘effetto lucido’. Stesso aspetto sia lavorando in discordanza che in concordanza. Talvolta si manifestano i ‘vasi uncinati’. Controfilo (b): si nota chiaramente quel processo di sollevamento che porta all’effetto opaco. Presenza di microstrappi lavorando in concordanza — Dans le sens du fil est clair un ‘effet brillant’ et on peut avoir des ‘vaisseaux crochetés’, contre fil un ‘effet mat’. On observe des petits arrachements usinant contre fil en avalant. [Foto Goli]

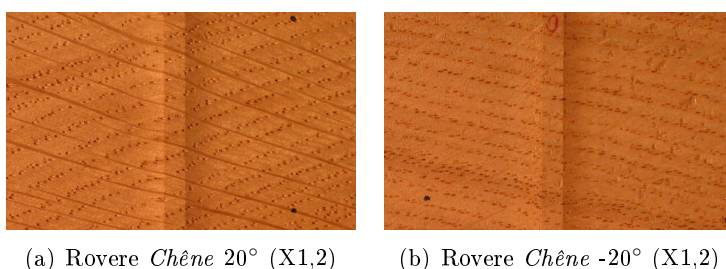


Figura 6.15: Nel senso del filo (a): ancora percepibile la compressione, superficie di buona qualità sia lavorando in concordanza che in discordanza. Ancora possibilità di formazione di ‘vasi uncinati’. Controfilo (b): si ha il manifestarsi di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e dei primi strappi riconducibili alla ‘fibra embriata strappata’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil ‘effet brillant’ et possibilité d’avoir des ‘vaisseaux crochetés’. Contre fil formation des ‘fibres comprimés’ usinant en opposition et des ‘fibres retournées’ de type arrachée usinant en avalant. [Foto Goli]

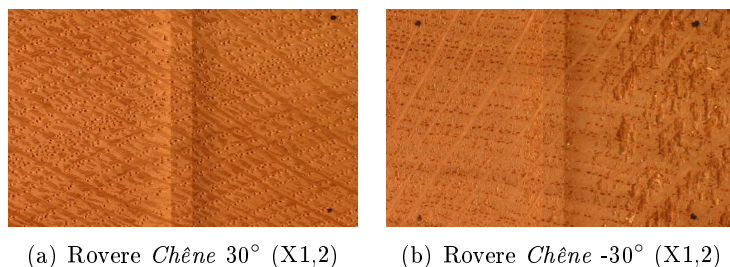


Figura 6.16: Nel senso del filo (a): si osserva un chiaro ‘effetto lucido’. La qualità è comunque elevata per entrambi i processi. Controfilo (b): ancora ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza, mentre in concordanza si ha la manifestazione di un’‘abbonante e diffusa ‘fibra embriciata strappata’ — Dans le ses du fil on observe l’‘effet brillant’. Contre fil formation des ‘fibres comprimés’ usinant en opposition et des ‘fibres retournées’ de type arrachée usinant en avalant. [Foto Goli]

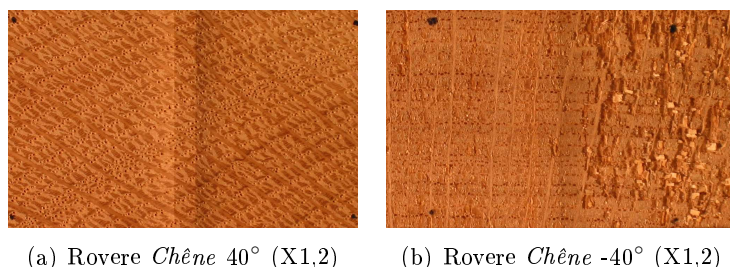


Figura 6.17: Nel senso del filo (a): ancora un effetto lucido ben visibile. Inizia a manifestarsi la ‘fibra pettinata’ nelle parti primaveraili. Controfilo (b): lavorando in discordanza si ha una pessima superficie affetta da ‘fibra pressata’ e da ‘fibra strappata’. In concordanza invece si ha la formazione di ‘fibra embriciata’ in gran parte di tipo ‘strappato’ ma con la presenza di alcune lamelle di tipo ‘incombente’ — Dans le ses du fil on observe un fort ‘effet brillant’ et des ‘fibres couchées’. Contrefil on opposition les défauts principaux sont les ‘fibres comprimés’ et les ‘arrachements’, en avalant les ‘fibres retournées’ de type arrachées. [Foto Goli]

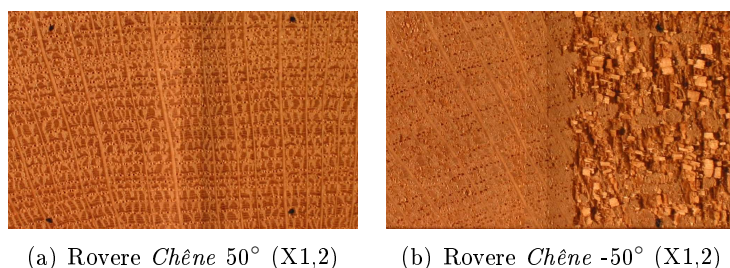


Figura 6.18: Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi’ affliggono il legno primaveraile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Rimane comunque chiaramente visibile l’‘effetto lucido’. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ e ‘fibra strappata’ lavorando in discordanza. In concordanza si ha ancora ‘fibra embriciata’ con una prevalenza della ‘strappata’ su quella ‘embriciata’ — Dans le ses du fil on observe un fort ‘effet brillant’ et des ‘fibres couchées’. Contrefil on opposition les défauts principaux sont ‘fibres comprimés’ et les ‘arrachements’ dans le bois de printemps’, en avalant les ‘fibres retournées’. [Foto Goli]

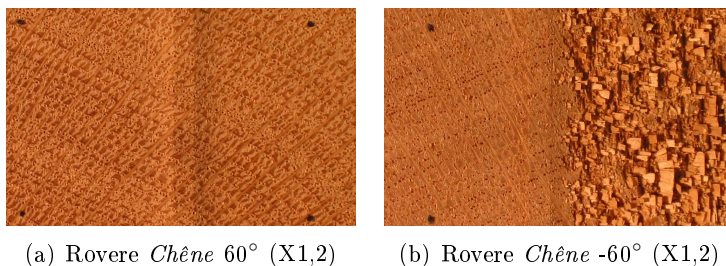


Figura 6.19: Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Anche se i processi aumentano di intensità, rimane comunque chiaramente visibile l’‘effetto lucido’. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ e ‘fibra strappata’ lavorando in discordanza. In concordanza si ha ancora ‘fibra embriciata’, in cui la componente ‘strappata’ diventa via via maggiormente importante — Dans le sens du fil on observe un fort ‘effet brillant’, des ‘fibres couchées’ et des ‘arachements profonds dans le bois de printemps’. Contrefil on oppose les défauts principaux sont ‘fibres comprimés’ et les ‘arrachements dans le bois de printemps’, en avalant les ‘fibres retournées’. [Foto Goli]

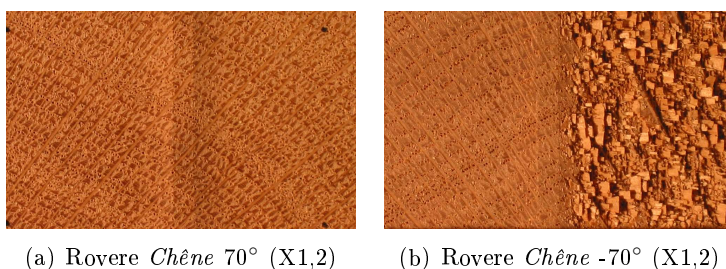


Figura 6.20: Nel senso del filo (a): stesse meccaniche della precedente ma che si aggravano, soprattutto per quanto riguarda gli ‘strappi primaverili’. La lavorazione in concordanza ed in discordanza porta risultati simili. Controfilo (b): come la precedente salvo che in concordanza la ‘fibra embriciata incombente’ prende il sopravvento su quella strappata — On observe les mêmes défauts que avant et la surface deviens de pire en pire. [Foto Goli]

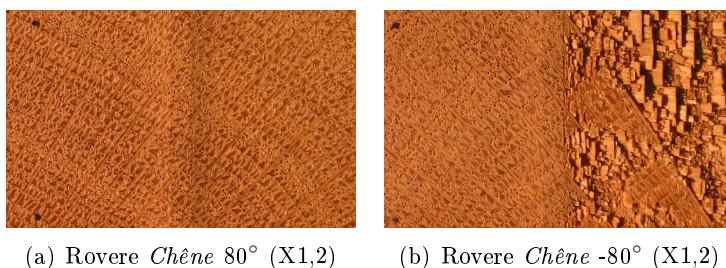


Figura 6.21: Nel senso del filo (a): aumento degli strappi primaverili, stesso risultato lavorando in discordanza ed in concordanza. Controfilo (b): superficie molto simile a quella lavorata nel senso del filo per la lavorazione in discordanza. ‘Fibra embriciata’ a prevalenza ‘strappata’ per la lavorazione in concordanza — On observe les mêmes défauts que avant et la surface deviens de pire en pire. [Foto Goli]

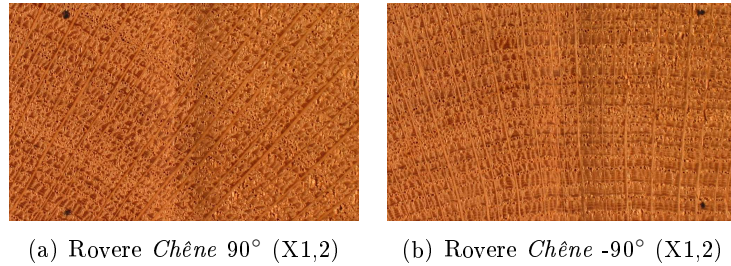


Figura 6.22: Lavorazione di testa (a e b). I risultati ottenuti sono uguali lavorando la superficie in un senso e dopo averla rigirata su se stessa, a dimostrazione della ripetibilità del test. Presenti in maniera diffusa gli ‘strappi primaverili profondi’ e la superficie ha un aspetto vagamente lucido. Si ha la stessa qualità sia lavorando discordanza che in concordanza. Il legno estivo risulta di ottima finitura. Tendenza occasionale al manifestarsi di ‘fibre embriciate’ lavorando in concordanza — Les défauts principaux sont les ‘fibres comprimées’ et les ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. [Foto Goli]

comunque si vede chiaramente la compressione eseguita sugli elementi cellulari lavorando ‘nel senso del filo’ e la trazione nella lavorazione eseguita ‘controfilo’ e chiari ‘effetto lucido’ ed ‘effetto opaco’, con qualche strappo lavorando controfilo in concordanza. Aumentando l’angolo della fibratura soltanto di 10° , per angoli della fibratura di 20° e -20° si osservano differenze molto più importanti quali l’affermarsi della ‘fibra strappata’ e della ‘fibra schiacciata’ in controfilo, mentre nel senso del filo si osserva un chiarissimo effetto lucido. Lavorando nel senso del filo aumentando l’angolo della fibratura si osserva un progressivo peggioramento della qualità, el’‘effetto lucido’ evolve verso gli ‘strappi primaverili profondi’, controfilo si hanno invece la ‘fibra strappata’ e la ‘fibra embriciata’ che diventano sempre più importanti, assieme alla ‘fibra schiacciata’ e agli ‘strappi primaverili profondi’. Le superfici infine convergono alla superficie ottenuta lavorando ‘in testa’.

6.6 Faggio (*Fagus sylvatica* L.)

Il faggio come tutti sanno è un legno abbastanza pregiato. Lo caratterizzano la grande omogeneità, la facile lavorabilità (entrambi motivi per cui è stato selezionato per questa prova), le elevate resistenze meccaniche, e la scarsa nervosità. Dall’altro lato un grande problema del faggio è la scarsa durabilità naturale. Da rapportare con due specie a forte eterogeneità e di non sempre facile lavorazione si è scelta questa specie come confronto, per la sua omogeneità e per lavorabilità. Si procede di seguito ad una descrizione dell’evoluzione dei fenomeni all’aumentare dell’angolo della fibratura lavorando sia in concordanza che in discordanza e nel senso del filo e controfilo.

6.6.1 Descrizione

Lavorando nel senso del filo in discordanza

Naturalmente la descrizione inizia dalla lavorazione a filo dritto e prende in esame tutte le superfici ottenute lavorando nel senso del filo fino alla lavorazione di in testa (Fig. 6.23(a), 6.24(a) e successive). Nella lavorazione effettuata a 0° la qualità è buona ed il taglio preciso e netto, la scissione avviene per taglio. Da questo stato, come per douglasia e rovere, aumentando l'angolo della fibratura si ha un netto e progressivo peggioramento della qualità della superficie, che però per il faggio rimane sempre a livelli accettabili. Infatti per le sue caratteristiche di lavorabilità e per la sua omogeneità non si verificano quei processi che caratterizzano douglasia e rovere e che portano ad un peggioramento importante della qualità superficiale. Per un angolo di 10° si nota già un leggero 'effetto lucido' per la compressione già in atto sugli elementi cellulari. Questo comporta una lieve rugosità al tatto, derivante dalla presenza di "fibre pettinate", che rimane comunque a livelli contenuti, e la superficie nel complesso si presenta buona. Aumentando l'angolo si ha un aggravamento dei fenomeni in atto che però rimane sempre contenuto fino a circa 70° . Aumentando ancora l'angolo, per 80° e 90° la superficie tende al peggioramento per il subentrare degli "strappi primaverili" anche se in forma lieve (vedi Tab. 6.11).

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. lucido, fibra pettinata
20°	eff. lucido, fibra pettinata
30°	eff. lucido, fibra pettinata
40°	eff. lucido, fibra pettinata
50°	eff. lucido, fibra pettinata
60°	eff. lucido, fibra pettinata
70°	fibra pettinata, strappi prim.
80°	fibra pettinata, strappi prim.
90°	fibra pettinata, strappi prim.

Tabella 6.11: Difetti presenti sulle superfici lavorando faggio nel senso del filo ed in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défaits typiques usinant du hêtre dans le sens du fil en opposition avec des angles du fil différents.

Lavorando nel senso del filo in concordanza

La reazione del legno a questo tipo di lavorazione è molto simile a quella ottenuta lavorando in discordanza, salvo che in questo caso la qualità lavorando in concordanza è leggermente migliore (Fig. 6.23(a), 6.24(a) e successive). Per questa lavorazione resta quindi valido quanto detto per la lavorazione eseguita in discordanza (vedi Tab. 6.12).

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. lucido, fibra pettinata
20°	eff. lucido, fibra pettinata
30°	eff. lucido, fibra pettinata
40°	eff. lucido, fibra pettinata
50°	eff. lucido, fibra pettinata
60°	eff. lucido, fibra pettinata
70°	fibra pettinata, strappi prim.
80°	fibra pettinata, strappi prim.
90°	fibra pettinata, strappi prim.

Tabella 6.12: Difetti presenti sulle superfici lavorando faggio nel senso del filo ed in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défaits typiques usinant du hêtre dans le sens du fil en avalant avec des angles du fil différents.

Lavorando controfilo in discordanza

Anche lavorando controfilo la descrizione inizia dalla lavorazione a filo dritto e prende in esame tutte le superfici ottenute lavorando controfilo fino alla lavorazione di in testa. Nella lavorazione effettuata a 0° si noti (Fig. 6.23(b), 6.24(b) e successive) come il taglio sia preciso e netto e la scissione sia avvenuta per taglio. Da questo stato aumentando l'angolo della fibratura si ha un progressivo peggioramento della qualità della superficie che al contrario di douglasia e rovere non è mai drastico. Contrariamente a queste, infatti, la superficie ottenuta lavorando controfilo non si presenta in nessun caso molto più turbata rispetto a quella ottenuta lavorando nel senso del filo. Per un angolo di -10° ancora non si notano difetti, tranne un leggero effetto opaco. Questa situazione resterà invariata fino a -20° . Per -30° si ha un peggioramento della qualità superficiale, ed inizia a manifestarsi la “fibra schiacciata” e gli “strappi primaverili” anche se in forma molto leggera, soprattutto sul legno primaverile. La situazione peggiora sensibilmente a -40° , -50° e -60° . La situazione migliora leggermente per -70° , -80° e -90° pur rimanendo in atto le stesse meccaniche, che però a questo punto convergono verso quelle in atto lavorando nel senso del filo (vedi Tab. 6.13).

Lavorando controfilo in concordanza

Abbiamo visto per douglasia e rovere l'enorme differenza della qualità finale della superficie ottenuta lavorando in discordanza o in concordanza. La lavorazione controfilo in concordanza pone problematiche assai diverse da quelle poste dalla lavorazione in discordanza, ma lavorando il faggio queste differenze si riducono sensibilmente. Nella lavorazione effettuata a 0° si noti (Fig. 6.23(b), 6.24(b) e successive) come il taglio sia preciso e netto e la scissione avvenga per taglio. Da questo stato, aumentando l'angolo della fibratura, come in tutti gli altri casi, si ha un netto e progressivo peggioramento della qualità della superficie, anche se molto meno importante rispetto alle già vista douglasia e alla rovere. Fino a 30° si ha infatti il manifestarsi dell'“effetto opaco”, come lavorando in discordanza.

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. opaco
20°	eff. opaco
30°	eff. opaco
40°	fibra schiacc., strap. prim. leggeri
50°	fibra schiacc., strap. prim. leggeri
60°	fibra schiacc., strap. prim. leggeri
70°	fibra schiacc., strap. prim. leggeri
80°	fibra schiacc., strap. prim. leggeri
90°	fibra schiacc., strap. prim. leggeri

Tabella 6.13: Difetti presenti sulle superfici lavorando faggio controfilo in discordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant du hêtre contre fil en opposition avec des angles du fil différents.

A 40° iniziano le ‘fibre schiacciate’, e l’unica significativa differenza inizia a manifestarsi a -50° con il subentrare degli ‘strappi primaverili profondi’ (vedi Tab. 6.14).

Angolo	Difetto conseguente
0°	Superficie ottima
10°	eff. opaco
20°	eff. opaco
30°	eff. opaco
40°	fibra schiacciata
50°	fibra schiacc., stra. prim. prof.
60°	fibra schiacc., stra. prim. prof.
70°	fibra schiacc., stra. prim. prof.
80°	fibra schiacc., stra. prim. prof.
90°	fibra schiacc., stra. prim. prof.

Tabella 6.14: Difetti presenti sulle superfici lavorando faggio controfilo in concordanza a differenti angoli della fibratura — Défauts typiques usinant du hêtre contre fil en avalant avec des angles du fil différents.

6.6.2 Analisi comparata

Lavorando nel senso del filo e controfilo

Per terminare questa analisi è importante spendere qualche parola sulle differenti evoluzioni che si hanno lavorando nel senso del filo e controfilo. La lavorazione effettuata a 0° è eseguita ‘a filo dritto’, quindi non esistono distinzioni, come per la ‘lavorazione in testa’. Con un’inclinazione di 10° e -10° si notano subito delle evidenti differenze. Si vede chiaramente sul legno estivo la compressione eseguita sugli elementi cellulari lavorando ‘nel senso del filo’ e la trazione nella lavorazione eseguita ‘controfilo’. Uno spiccato ‘effetto lucido’ caratterizza la

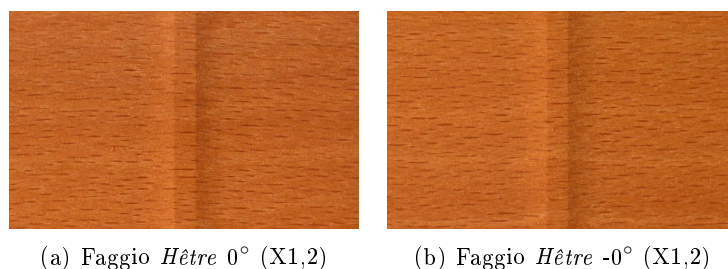


Figura 6.23: Le due superfici sono uguali (a e b), a testimonianza che ripetendo il test dopo aver ruotato su se stesso il pezzo, cioè lavorando con lo stesso angolo della fibratura il risultato è lo stesso. La scissione in questo caso è avvenuta per ‘taglio prevalente’ — Est clair que la séparation est par ‘coupe prédominante’. Les deux surfaces sont usinées après avoir retourné la pièce de 180° sur elle même, pour montrer que le fil est droit et que le résultat est répétable. [Foto Goli]

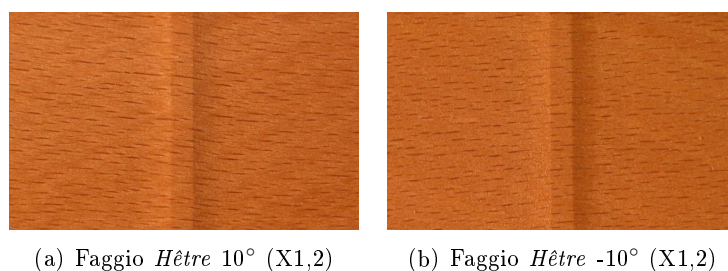


Figura 6.24: Nel senso del filo (a): si inizia a percepire il processo di compressione. Si manifesta l’‘effetto lucido’. Controfilo (b): si ha il manifestarsi dell’‘effetto opaco’ sia lavorando in discordanza che in concordanza — Les défauts sont beaucoup moins faibles par rapport au douglas at au chêne. Dans le sens du fil on observe l’‘effet brillant’, contre fil l’‘effet mat’ usinant soit en avalant, soit en opposition. [Foto Goli]

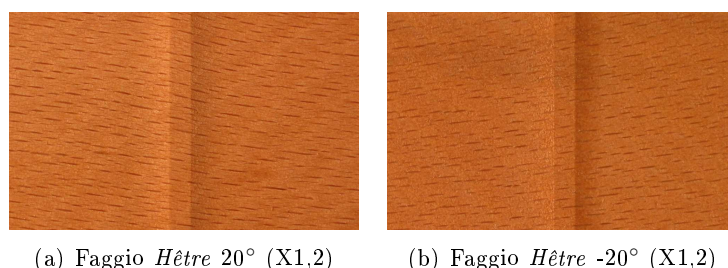


Figura 6.25: Nel senso del filo (a): percepibile la compressione, la ‘fibra pettinata’ e l’‘effetto lucido’, superficie di buona qualità sia lavorando in concordanza che in discordanza. Controfilo (b): si ha il manifestarsi dell’‘effetto opaco’ sia lavorando in discordanza che in concordanza — Dans le sens du fil par rapport à l’usinage à 10° et -10° il y a plus de ‘fibres couchées’. Pour le rest il y a pas des variations sensibles. [Foto Goli]

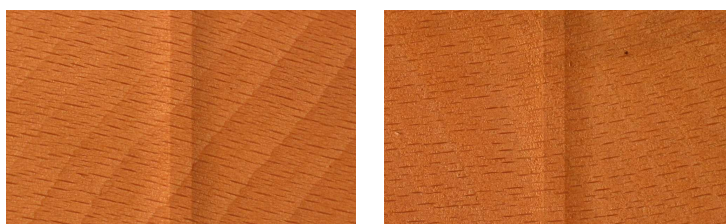
(a) Faggio *Hêtre* 30° (X1,2)(b) Faggio *Hêtre* -30° (X1,2)

Figura 6.26: Nel senso del filo (a): si osserva un chiaro ‘effetto lucido’ e una chiara ‘fibra pettinata’. La qualità è comunque elevata per entrambi i processi. Controfilo (b): ‘fibra schiacciata’ sia lavorando in discordanza che in concordanza — Dans le sens du fil ‘fibres couchées’, contrefil ‘fibres comprimées’. [Foto Goli]

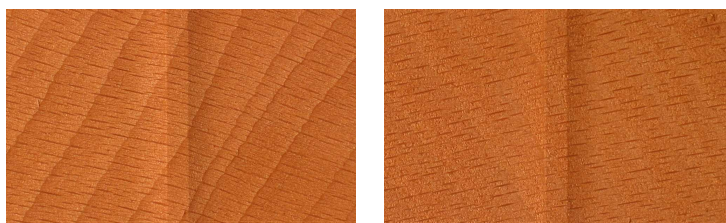
(a) Faggio *Hêtre* 40° (X1,2)(b) Faggio *Hêtre* -40° (X1,2)

Figura 6.27: Nel senso del filo (a): ancora un ‘effetto lucido’ e ‘fibra pettinata’ ben visibili. Controfilo (b): sia lavorando in discordanza che in concordanza inizia a manifestarsi la ‘fibra schiacciata’ — Les défauts deviens de plus en plus importants, mais ils restent les mêmes. [Foto Goli]

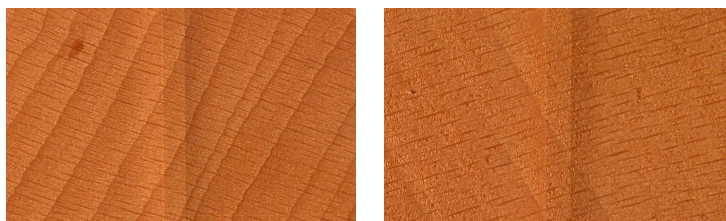
(a) Faggio *Hêtre* 50° (X1,2)(b) Faggio *Hêtre* -50° (X1,2)

Figura 6.28: Nel senso del filo (a): il problema principale risulta ancora essere l’‘effetto lucido’. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ sia lavorando in discordanza che in concordanza. Lavorando in concordanza iniziano a manifestarsi gli ‘strappi primaverili profondi’ — Dans le sens du fil le problème principaux est encore l’‘effet brillant’. Contrefil le problème principaux sont les ‘fibres comprimées’ et il commencent la presence des ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. [Foto Goli]

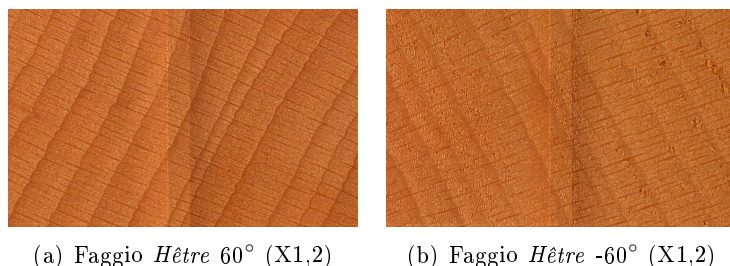


Figura 6.29: Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi primaverili profondi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e in concordanza, e degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil ‘fibres couchées’ et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contre fil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et avalant, et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ pour l’usinage en opposition. [Foto Goli]

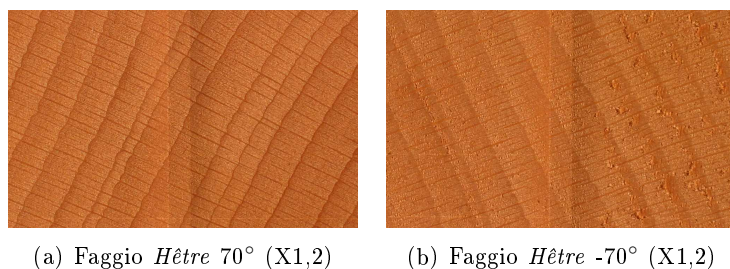


Figura 6.30: Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi primaverili profondi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e in concordanza, e degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in concordanza — Pas de variations importants par rapporta à la precedente. [Foto Goli]

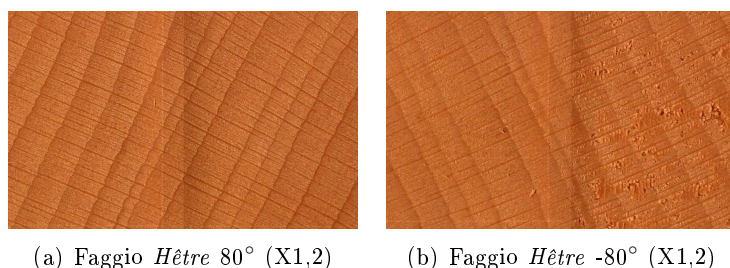


Figura 6.31: Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi primaverili profondi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e in concordanza, e degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil ‘fibres couchées’ et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contre fil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et avalant, et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ pour l’usinage en opposition. [Foto Goli]

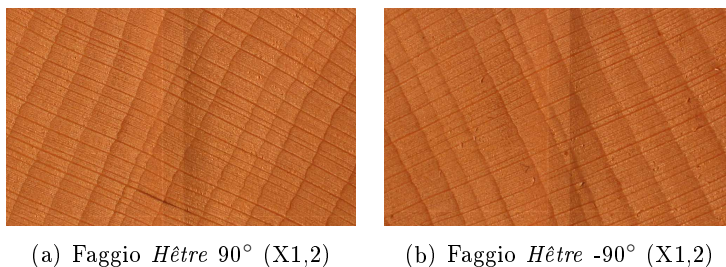


Figura 6.32: Nel senso del filo (a): ‘fibra pettinata’ e ‘strappi primaverili profondi’ affliggono il legno primaverile sia lavorando in discordanza che in concordanza. Controfilo (b): si ha la formazione di ‘fibra schiacciata’ lavorando in discordanza e in concordanza, e degli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando in concordanza — Dans le sens du fil ‘fibres couchées’ et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’. Contre fil ‘fibres comprimées’ usinant en opposition et avalant, et ‘arrachements profonds dans le bois de printemps’ pour l’usinage en opposition. [Foto Goli]

superficie lavorata nel senso del filo, mentre un forte ‘effetto opaco’ caratterizza le superfici lavorate controfilo. La qualità della superficie rimane pressoché invariata fino a 40° , sia lavorando nel senso del filo che controfilo, ed i processi in atto, fino a questa angolazione, sono principalmente l’‘effetto lucido’ e l’‘effetto opaco’. Aumentando l’angolo della fibratura i processi iniziano a distinguersi, in particolare negli ‘strappi primaverili profondi’ lavorando nel senso del filo, e nella ‘fibra schiacciata’ con la presenza congiunta di ‘strappi primaverili profondi’ lavorando controfilo. La qualità finale del faggio è molto superiore rispetto a quella ottenuta lavorando douglasia e rovere.

6.7 Evoluzione generale delle superfici

Fino ad ora a titolo di esempio abbiamo svolto la nostra analisi su tre legni campione, douglasia, rovere e faggio. In base alle riflessioni svolte sulle origini meccaniche, in base all’esperienza acquisita per lavorare queste specie ed in base alle definizioni date dei processi meccanici in atto è ora possibile analizzare il problema in maniera generale. È impossibile sviscerare il problema nella sua globalità: le riflessioni andrebbero fatte per ogni tipo di legno, a seconda delle sue caratteristiche meccaniche, ma anche delle sue caratteristiche anatomiche, differenziando i legni omogenei da quelli eterogenei. Essendo troppo complesso fare una distinzione di questo tipo si cercherà quindi di fornire un’idea delle evoluzioni dei difetti superficiali al variare dell’angolo della fibratura. L’analisi procederà partendo dallo stato di ‘filo dritto’ per arrivare allo stato di lavorazione ‘in testa’. Le lavorazioni partono dunque dallo stesso stato (filo dritto) per arrivare ad un nuovo stato comune (lavorazione in testa) seguendo percorsi diversi. È interessante notare come per angoli piccoli si abbiano comportamenti estremamente diversi, mentre poi all’aumentare dell’angolo le reazioni convergono fino a divenire identiche ad un angolo di 90° .

6.7.1 Lavorando nel senso del filo in discordanza

Per angoli di 10° a seguito della compressione esercitata (anche se esigua), si possono osservare ‘strappi per sfilamento’, ritorni elastici anomali con conseguenze come il ‘legno primaverile sporgente’ per specie eterogenee o i ‘vasi uncinati’ per specie con vasi grandi. Si osserva inoltre molto spesso il formarsi dell’‘effetto lucido’. Spesso però si produce una ‘scissione per taglio’. Aumentando l’angolo, a 20° si ottiene un aggravamento delle meccaniche in atto, formazione di ‘strappi per sfilamento’, ‘legno primaverile sporgente’ e ‘vasi uncinati’ ed ‘effetto lucido’ maggiormente visibile. Le stesse meccaniche fino ad ora descritte continuano poi ad interessare la superficie anche ad angoli maggiori con maggiore intensità. Gradualmente diventano più intense per 30° e 40° , fino al raggiungimento dei 50° . A 50° gli ‘strappi primaverili profondi’ iniziano a divenire importanti sostituiscono le altre meccaniche, per crescere di intensità fino a raggiungere il loro massimo a 90° (vedi Tab. 6.15).

Angolo	Difetti lavorando in discordanza nel senso del filo
10°	Eff. lucido, strappi per sfil., prim. spor., vasi unci.
20°	Eff. lucido, strappi per sfil., prim. spor., vasi unci.
30°	Eff. lucido, strappi per sfil., prim. spor., vasi unci.
40°	Eff. lucido, strappi per sfil., prim. spor.
50°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi
60°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi
70°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi
80°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi
90°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi

Tabella 6.15: Evoluzione dei difetti lavorando in ‘discordanza’ e ‘nel senso del filo’ —
Défauts typiques usinant dans le sens du fil en opposition.

6.7.2 Lavorando controfilo in concordanza

Per angoli di -10° a seguito della trazione esercitata sugli elementi cellulari si possono osservare molteplici fenomeni: ‘l’effetto opaco’ su legni a densità elevata e soprattutto la ‘fibra lanuginosa’ nei legni meno densi. La ‘fibra lanuginosa’ può essere talvolta mescolata alla ‘fibra strappata’. A seconda delle caratteristiche del legno la ‘fibra lanuginosa’ può evolvere più o meno velocemente verso la ‘fibra schiacciata’, che si forma sia nei legni ad alta densità che a bassa densità aumentando l’angolo della fibratura. Per -20° si osserva talora la presenza di ‘fibra lanuginosa’, talora la presenza di ‘fibra schiacciata’, che poi prende il sopravvento con l’aumento di inclinazione della fibratura a -30° . A -30° spesso si assiste anche alla formazione delle fibre strappate. Queste meccaniche rimangono le stesse, anche se se si aggravano progressivamente per -40° e -50° . A -50° gli strappi diminuiscono per lasciare posto ancora alla ‘fibra pressata’ ed agli ‘strappi primaverili profondi’, che si aggravano progressivamente fino a raggiungere il loro massimo a 90° (vedi Tab. 6.16).

Angolo	Difetti lavorando in discordanza controfilo
10°	Eff. opaco, f. lanuginosa, f. schiacciata, f. strappata
20°	Eff. opaco, f. lanuginosa, f. schiacciata, f. strappata
30°	Eff. opaco, f. lanuginosa, f. schiacciata, f. strappata
40°	Eff. opaco, f. schiacciata, f. strappata
50°	Eff. opaco, f. schiacciata, f. strappata
60°	Eff. opaco, f. schiacciata, strappi primaverili profondi
70°	Eff. opaco, f. schiacciata, strappi primaverili profondi
80°	Eff. opaco, f. schiacciata, strappi primaverili profondi
90°	Eff. opaco, f. schiacciata, strappi primaverili profondi

Tabella 6.16: Evoluzione dei difetti lavorando in ‘discordanza’ e ‘controfilo’ — Défaits typiques usinant contre fil en avalant.

6.7.3 Lavorando nel senso del filo in concordanza

Questa lavorazione può essere più meno simile a quella eseguita in discordanza. In termini generali possiamo dire che più è densa la specie più si assomiglieranno le due reazioni. In generale anche per i legni meno densi possiamo dire che la reazione generale è la stessa, salvo che gli ‘strappi per sfilamento’ cominciano ad essere molto ben visibili anche con angoli della fibratura di 10°. L’evoluzione è poi la stessa fino a 50°, dove iniziano ad essere importanti gli ‘strappi primaverili profondi’ (var. 2) che come nell’altro caso raggiungeranno la loro massima intensità ad un angolo della fibratura di 90° (vedi Tab. 6.17).

Angolo	Defetti (Difetti lavorando in concordanza nel senso del filo)
10°	Eff. lucido, strappi per sfil., prim. spor., vasi unci.
20°	Eff. lucido, strappi per sfil., prim. spor., vasi unci.
30°	Eff. lucido, strappi per sfil., prim. spor., vasi unci.
40°	Eff. lucido, strappi per sfil., prim. spor.
50°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi
60°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi
70°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi
80°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi
90°	Eff. lucido, strappi primaverili profondi

Tabella 6.17: Evoluzione dei difetti lavorando in ‘concordanza’ e ‘nel senso del filo’ — Défaits typiques usinant dans le sens du fil en avalant.

6.7.4 Lavorando controfilo in concordanza

Il risultato è molto simile a quello ottenuto lavorando in discordanza, con la differenza principale che la ‘fibra strappata’ è sostituita dalla ‘fibra embriciata’ e che gli ‘strappi primaverili profondi’ var. 1 sono sostituiti dalla var. 2. Per angoli di -10° a seguito della trazione esercitata sugli elementi cellulari si possono osservare molteplici fenomeni, ‘l’effetto opaco’ su legni a densità elevata e soprattutto la ‘fibra lanuginosa’ var. 2 nei legni meno densi. La ‘fibra

lanuginosa' può essere talvolta mescolata alla 'fibra strappata'. A seconda delle caratteristiche del legno la 'fibra lanuginosa' può evolvere più o meno velocemente verso la 'fibra schiacciata', che si forma sia nei legni ad alta densità, che in quelli a bassa densità aumentando l'angolo della fibratura. Per -20° si osserva talora la presenza di 'fibra lanuginosa', talora la presenza di 'fibra schiacciata', che poi prende il sopravvento con l'aumento di inclinazione della fibratura, ma soprattutto talvolta già con questo angolo può iniziare a manifestarsi la 'fibra embriciata', che per angoli bassi è di tipo 'strappato'. A -30° si ha la formazione diffusa della 'fibra embriciata strappata' nel legno a maggior densità. Questa meccanica resterà quella che affligge maggiormente la superficie all'aumentare dell'angolo della fibratura e potrà trovarsi sulla superficie assieme alla 'fibra schiacciata'. All'aumentare dell'angolo della fibratura, nella 'fibra embriciata' si ha la sostituzione del tipo 'strappato' con quello 'incombente'. A -40° la 'fibra embriciata' resta prevalentemente di tipo strappato. A -50° si inizia a passare verso il tipo incombente che prende il sopravvento in -60° , -70° e -80° (in alcuni casi tra -50° e -60° si osserva una diminuzione del fenomeno). A -90° infine la 'fibra embriciata' si manifesta saltuariamente e quindi si torna ai difetti tipici della lavorazione discorde, 'strappi primaverili profondi' var. 2 (vedi Tab. 6.18).

Angolo	Difetti lavorando in concordanza controfilo
10°	Eff. opaco, f. lanuginosa, f. schiacciata, f. strappata
20°	Eff. opaco, f. lanuginosa, f. schiacciata
30°	Eff. opaco, f. lanuginosa, f. schiacciata, f. embriciata strappata
40°	Eff. opaco, f. schiacciata, f. embriciata strappata
50°	Eff. opaco, f. schiacciata, f. embriciata incombente
60°	Eff. opaco, f. schiacciata, f. embriciata incombente
70°	Eff. opaco, f. schiacciata, f. embriciata incombente
80°	Eff. opaco, f. schiacciata, f. embriciata incombente
90°	Eff. opaco, strappi primaverili profondi

Tabella 6.18: Evoluzione dei difetti lavorando in 'concordanza' e 'controfilo' — Défauts typiques usinant cote fil en opposition.

Qualité d'usinage et angle du fil

Matériaux et Méthodes

Pour déterminer la qualité d'usinage de certaines essences en modifiant l'angle du fil par rapport au plan d'usinage nous avons testé deux essences, le douglas et le chêne. Nous avons choisi un résineux et un feuillu pour faire apparaître les différentes réactions en usinant des bois de densité différentes. Après de nombreux essais on a fixé les paramètres d'usinages indiquées dans les tableaux 1.1 et 1.2. Pour ce qui concerne les outils nous avons choisi des plaquettes carbure standard pour nous garantir d'un affûtage constant. Pour les essais d'usinage, nous avons fait varier l'angle du fil d'un pas de 10° (de 0° à 90° dans le sens du fil et contre fil, soit 16 orientations). Avant d'usiner avec une profondeur radiale fixée à 0,5 mm, nous pratiquions 10 passages à 0,1 mm afin d'avoir une bonne surface avant usinage. Chaque échantillon a été usiné sur une moitié en avalant et sur l'autre moitié en opposition.

*Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco var *menziesii*)*

Douglas usinée dans le sens du fil en opposition

L'évolution des défauts avec ce type d'usinage est la suivante: 0° surface de bonne qualité, 10° effet brillant et fibres arrachées par glissement, 20° et 30° mêmes tendances accentuées, 40° évolution forte avec des arrachements profonds (var. 1) dans le bois de printemps. Ce dernier défaut sera présent dans la surface et sera de plus en plus important jusqu'à 90° .

Douglas usinée dans le sens du fil en avalant

Pour ce type d'usinage, la séquence se rapproche beaucoup de la précédente.

Douglas usinée en contre-fil en opposition

L'évolution des défauts est alors la suivante: 0° surface de bonne qualité, à -10° commence la formations des surfaces pelucheuses, à -20° on à toujours des surfaces pelucheuses qui coexistent avec des fibres comprimées, pour -30° l'évolution va vers les fibres comprimées qui deviennent plus importantes pour -40° et -50° pour être substituées par les arrachements profonds (var. 1) dans le bois de printemps à -60° , -70° , -80° jusqu'à -90° .

Douglas usinée en contre-fil en avalant

Ce type d'usinage donne des problèmes assez différents par rapport à l'usinage en opposition: 0° surface de bonne qualité, à -10° débute la formation de surfaces pelucheuses (var. 2), à -20° on trouve encore des surfaces pelucheuses (var. 2) qui coexistent avec des fibres comprimées. La différence la plus importante commence à -30° ou apparaissent des fibres retournées de type arrachée qui s'observent aussi pour -40° . A -50° et -60° on revient aux fibres comprimées qui laissent la place à -70° et -80° aux fibres retournées de type non arrachées. Enfin, pour -90° on revient aux arrachements profonds dans le bois de printemps.

Chêne (Quercus petraea (Matt.) Liebl)***Chêne usinée dans le sens du fil en opposition***

L'évolution des défauts avec ce type d'usinage est la suivante: 0° surface de bonne qualité, à 10° commence l'effet brillant qui va caractériser la surface jusqu'à 50° , avec toutefois des défauts moins importants comme les vaisseaux rappeurs. A partir de 60° la surface va devenir de pire en pire avec des arrachements profonds (var. 1) dans le bois de printemps qui augmentent progressivement d'intensité pour culminer pour 90° .

Chêne usinée dans le sens du fil en avalant

Dans ce type d'usinage on n'observe pas des différences remarquables par rapport à l'usinage en opposition.

Chêne usinée en contre-fil en opposition

L'évolution des défauts avec ce type d'usinage est la suivante: 0° surface de bonne qualité, à -10° dans le chêne il n'y a pas des gros défauts, on observe simplement un effet mat, cet effet persiste même à -20° où on le trouve combiné avec des arrachements et des fibres comprimées. Pour -30° nous observons les mêmes défauts, et à -40° de demeurent que l'effet mat et des arrachements. A -50° le défaut principal est de la fibre comprimée. Ce défaut s'accroît jusqu'à -70° pour ensuite décroître pour -80° et -90° .

Chêne usinée en contre-fil en avalant

Avec cette technique les résultats obtenus sont assez différents par rapport à l'usinage en opposition. La principale différence réside dans la formation de fibres retournées de type arrachées et de type non arrachées. Pour 0° la surface est de bonne qualité, entre -10° et -30° on observe un important effet mat, mais surtout la formation des fibres retournées de type arrachée. Entre -40° et -80° les fibres retournées de type arrachées deviennent de type non arrachées. A 90° le défaut principal est des fibres comprimées.

Hêtre (*Fagus sylvatica* L.)

Hêtre usiné dans le sens du fil en opposition

L'évolution des défauts avec ce type d'usinage est la suivante : 0° la surface est de bonne qualité, à 10° commence l'effet brillant qui va caractériser la surface jusqu'à 70°, avec toutefois des défauts moins importants telles les "fibres couchées". La qualité est bien meilleure par rapport au bois de douglas et de chêne. De 80° et 90° la surface va empirer avec des arrachements (var. 1) dans le bois de printemps mais qui n'atteignent jamais le degré observé dans le douglas ou dans le chêne.

Hêtre usiné dans le sens du fil en avalant

Dans ce type d'usinage on n'observe pas de différences remarquables par rapport à l'usinage en opposition même si l'usinage en avalant donne une meilleure qualité qu'en opposition. Mais compte tenu du haut niveau de qualité générale, on peut dire que la différence n'est vraiment pas très significative.

Hêtre usiné en contre-fil en opposition

L'évolution des défauts avec ce type d'usinage est la suivante: 0° la surface est de bonne qualité, à -10° on n'observe pas de gros défauts mais simplement un effet mat qui persiste même à -20°. À partir de -30°, la surface s'altère (sans jamais atteindre le niveau de dégradation observé chez le douglas et chez le chêne) et l'effet mat subsiste. On le trouve combiné à de légers arrachements du bois de printemps et à des fibres comprimées. À partir de -40° la surface empire jusqu'à -60°, et les mécanismes déjà observés pour -30° s'accroissent. Enfin la surface s'améliore un petit peu en usinant à -70°, -80° et -90°.

Hêtre usiné en contre-fil en avalant

Pour le hêtre usiné avec cette technique, les résultats obtenus ne sont pas très différents de ceux obtenus par un usinage en opposition. En effet on n'observe pas la formation de fibres retournées de type arrachées et de type non arrachées. Ainsi pour 0° la surface est de bonne qualité, entre -10° et -30° on observe un important effet mat. À partir de -40° on observe la formation de "fibres comprimées". À partir des -50° ce défaut est accompagné d'arrachements profonds dans le bois de printemps qui caractérisent ensuite les surfaces jusqu'à -90°.

Evolution générale des surfaces***Usinées dans le sens du fil en opposition***

Angle	Défaut induit
0°	Surface de bonne qualité
10°	effet brillant, arrachements par glissement, bois de printemps proéminent, vaisseaux rappeurs
20°	effet brillant, arrachements par glissement, bois de printemps proéminent, vaisseaux rappeurs
30°	effet brillant, arrachements par glissement, bois de printemps proéminent, vaisseaux rappeurs
40°	effet brillant, arrachements par glissement, bois de printemps proéminent
50°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps
60°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps
70°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps
80°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps
90°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps

Tabella 6.19: Evolution générale des surfaces usinant dans le sens du fil en opposition.

Usinées contre fil en opposition

Angle	Défaut induit
0°	surface de bonne qualité
-10°	effet mat, surfaces pelucheuses, fibres comprimées, arrachements
-20°	effet mat, surfaces pelucheuses, fibres comprimées, arrachements
-30°	effet mat, surfaces pelucheuses, fibres comprimées, arrachements
-40°	effet mat, fibres comprimées, arrachements
-50°	effet mat, fibres comprimées, arrachements
-60°	effet mat, fibres comprimées, arrachements profonds dans le bois de printemps
-70°	effet mat, fibres comprimées, arrachements profonds dans le bois de printemps
-80°	effet mat, fibres comprimées, arrachements profonds dans le bois de printemps
-90°	effet mat, fibres comprimées, arrachements profonds dans le bois de printemps

Tabella 6.20: Evolution générale des surfaces usinant contre fil en opposition.

Usinées dans le sens du fil en avalant

Angle	Défaut induit
0°	surface de bonne qualité
10°	effet brillant, arrachements par glissement, bois de printemps proéminent, vaisseaux rappeurs
20°	effet brillant, arrachements par glissement, bois de printemps proéminent, vaisseaux rappeurs
30°	effet brillant, arrachements par glissement, bois de printemps proéminent, vaisseaux rappeurs
40°	effet brillant, arrachements par glissement, bois de printemps proéminent
50°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps
60°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps
70°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps
80°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps
90°	effet brillant, arrachements profonds dans le bois de printemps

Tabella 6.21: Evolution générale des surfaces usinant dans le sens du fil en avalant.

Usinées contre fil en avalant

Angle	Défaut induit
0°	surface de bonne qualité
-10°	effet mat, surfaces pelucheuses, fibres comprimées, arrachements
-20°	effet mat, surfaces pelucheuses, arrachements
-30°	effet mat, surfaces pelucheuses, arrachements, fibres retournées de type arrachée
-40°	effet mat, arrachements, fibres retournées de type arrachée
-50°	effet mat, arrachements, fibres retournées de type non arrachée
-60°	effet mat, arrachements, fibres retournées de type non arrachée
-70°	effet mat, arrachements, fibres retournées de type non arrachée
-80°	effet mat, arrachements, fibres retournées de type non arrachée
-90°	effet mat, arrachements profonds dans le bois de printemps

Tabella 6.22: Evolution générale des surfaces usinant contre fil en avalant.

Capitolo 7

Qualità finale e metodi oggettivi di misura

Sommario: I metodi oggettivi per la valutazione della qualità finale delle superfici lavorate sono molteplici. Uno dei più efficaci sicuramente è l'analisi dei profili. Si propongono alcune generalità su questa tecnica.

7.1 Introduzione

Se da un lato è importante comprendere le meccaniche di formazione delle superfici, dall'altro è estremamente opportuno poter valutare la loro qualità finale con parametri oggettivi. Se l'analisi visuale si è rivelata molto efficace, l'analisi dei profili non è certo da meno. L'analisi dei profili per il legno non ha ancora raggiunto uno stato avanzato dell'arte. Sarebbe essenziale che la ricerca contribuisse a fare chiarezza sui parametri più adatti a descrivere le superfici del legno, o ad introdurne di nuovi. L'analisi dei profili sarà brevemente analizzata nei suoi principi generali in questo capitolo.

7.2 Generalità sull'analisi dei profili

L'analisi dei profili è un utile ausilio per la determinazione oggettiva della qualità di una superficie. I profili possono essere misurati per mezzo di speciali macchine dette "profilometri" ed i profili misurati possono essere analizzati per mezzo di calcolatori. La profilometria può essere di più tipi:

- 2D
- 3D

La tecnica della profilometria 2D consiste nell'eseguire una singola strisciata sulla superficie da valutare e nell'analisi della singola strisciata. La 3D consiste invece nell'eseguire più strisciate per poi effettuare un'analisi nelle tre dimensioni. La 2D offre l'oggettivo vantaggio di essere più rapida nell'esecuzione e di essere altrettanto affidabile se eseguita nei posti giusti.

I trasduttori utilizzati per misurare il profilo possono essere fondamentalmente di due tipi:

- a contatto o meccanici
- senza contatto o laser

Per quelli a contatto spesso si dice che durante la misura il trasduttore può influire sulla superficie piegando le fibre, ma questa affermazione si può in generale ritenere falsa. Entrambi i metodi sono efficaci ed accurati. Il profilo viene misurato con l'ausilio di apposite macchine e una volta acquisito il profilo questo deve essere poi analizzato. Il “profilo nominale” è quello che avremmo voluto ottenere, il “profilo reale” è quello che effettivamente ha la superficie, quello che noi andremo ad analizzare è il “profilo misurato” che se lo strumento è preciso e la misura con accuratezza si avvicinerà molto a quello reale, anche se non sarà mai uguale. Il profilo sarà poi analizzato per mezzo di operazioni di filtraggio e le interferenze saranno differentemente nominate in base alla lunghezza d'onda impostata nel filtro. Le deviazioni dal profilo nominale considerate nel campo delle onde lunghe rappresentano quindi lo “scarto di forma”, le irregolarità molto fini la “rugosità” e quelle intermedie l’“ondulazione”. Dal profilo misurato adeguatamente filtrato si ottengono dunque tre profili elaborati:

- il profilo primario
- l'ondulazione
- la rugosità

Il profilo primario rappresenta il “profilo misurato” meno lo “scarto di forma”, l’“ondulazione” il “profilo primario” filtrato con un filtro passa-banda compreso tra lo scarto di forma e la rugosità, la “rugosità” il “profilo primario” filtrato con un filtro passa-alto settato su lunghezze d'onda ‘piccole’. Il profilo primario è indicato dalla lettera maiuscolo “P”, l'ondulazione dalla lettera maiuscola “W” e la rugosità dalla lettera maiuscola “R”. Per ognuno di questi profili possono essere effettuate singole analisi. Il pedice ‘a’ accanto ad una lettera maiuscola indica che sta misurando l'irregolarità media del profilo, il pedice ‘v’ che si sta misurando la valle del profilo più distante dalla “linea media” del profilo, il pedice ‘p’ che si sta misurando il picco più distante dalla “linea media” del profilo ed il pedice ‘t’ che si sta misurando la distanza tra la valle più profonda ed il picco più alto. I parametri calcolabili sono numerosi, ma in questa trattazione ci limitiamo a citare i parametri fondamentali, o quelli utili alla comprensione del lavoro svolto.

7.3 L'analisi dei profili sul legno

L'analisi dei profili sul legno è una pratica in uso da molto tempo. Spesso il parametro più usato è la rugosità, ma non è detto che sia il più adatto. La rugosità è un parametro che tiene conto di irregolarità estremamente piccole,

spesso paragonabili alle irregolarità dovute alla struttura anatomica del materiale, e spesso le lunghezze d'onda di filtraggio sono troppo basse per poter comprendere le irregolarità di lavorazione chiaramente visibili dall'occhio umano. L'ondulazione si presta di più a questo tipo di analisi ma anche in questo caso i filtri devono essere impostati e per le differenti specie non è detto che vi si adatti sempre lo stesso tipo di filtraggio. La soluzione al problema è quella dell'utilizzo del profilo primario: questo permette di agire in maniera molto semplice perché non deve essere fatta nessuna regolazione e ci permette di ottenere dati più affidabili rispetto a quelli ottenuti filtrando. I parametri che a nostro avviso più ci aiutano a valutare oggettivamente una superficie lavorata sono Pa, che ci indica l'irregolarità media della superficie e Pt, che ci dice lo scarto tra il punto più alto ed il punto più basso della superficie, dandoci così un'idea dell'entità dei fenomeni. Per maggiori informazioni sull'argomento si invita a consultare l'“Appendice A”.

Qualité et méthodes objectives de mesure

Généralités sur l'analyse des profils

L'analyse des profils est un important outil pour la classification objective de la qualité des surfaces. Les profils peuvent être mesurés avec des machines qui s'appellent des "profilomètres" dont le signal est exploité par ordinateur. L'analyse des profils peut être de deux types: 2D et 3D. L'analyse 2D ne concerne qu'un seul profil, l'analyse 3D concerne plusieurs profils les uns à côté des autres (analyse de surface). Les profils peuvent être mesurés en faisant appel à différentes technologies : stylet (palpage mécanique) ou laser (sans contact). D'après le profil mesuré, on peut générer une grande quantité d'analyses différentes et d'informations qui dépendent du type de filtre utilisé dans les calculs. Si on utilise seulement un filtre de forme on aura le profil primaire. Si on filtre le signal avec un filtre passe-bande avec une longueur d'onde comprise entre l'écart de forme et la rugosité le résultat est l'ondulation, si on filtre avec une longueur d'onde petite le résultat est la rugosité.

L'analyse des profils dans le bois

L'analyse des profils dans le bois est tentée depuis longtemps. Souvent un des problèmes réside dans le réglage des filtres afin que les irrégularités dues à la structure anatomique du bois ne soient pas pris en compte dans la mesure. Après plusieurs essais, le parti pris a été de ne pas filtrer puis de faire les analyses directement sur le profil primaire. Pour plus d'information, se reporter à l'"Appendice A".

Capitolo 8

Conclusioni

8.1 Conclusioni sintetiche

Questa tesi si è occupata di molteplici aspetti riguardanti le lavorazioni del legno ed è dunque complesso tracciare delle conclusioni generali. Ogni capitolo, trattando temi diversi (qualità visuale, meccaniche di formazione, analisi dei profili e forze di taglio), contiene al suo interno conclusioni che probabilmente non è necessario riassumere in questa sede. Ciononostante è importante comprendere che, oltre ai singoli aspetti già analizzati, ciò che più conta è la visione di insieme che scaturisce da questo lavoro. Lo studio fondamentale del processo di taglio (che non è certo una novità) integrato dagli aspetti biologici del legno (che non sono certo una novità) ha aperto nuove strade per un'interpretazione bio-meccanica delle lavorazioni. L'unione della riflessione sul processo di base, unita alle conoscenze legate al materiale, porta alla comprensione approfondita delle meccaniche in atto durante il taglio del legno. La comprensione di queste meccaniche permette di poter prevedere lo stato della superficie finale in funzione delle caratteristiche del materiale. Questo porta ad una maggiore precisione nella descrizione visuale dei difetti, che può essere integrata dall'uso di parametri oggettivi. Tali parametri possono aiutare all'esecuzione di prove comparative tra diverse lavorazioni, diverse materie prime e materiali. Un'interpretazione unica dei processi di taglio e di origine della superficie del legno, legata alle caratteristiche del processo e del materiale, sembra quindi possibile in una nuova visione di tipo bio-meccanico delle lavorazioni del legno.

8.2 Conclusioni generali

Questo lavoro ha studiato da molteplici punti di vista l'origine delle superfici del legno a seguito di lavorazione con utensile rotante, concertando assieme più tipi di lavorazione e di modalità di analisi delle superfici. Le prove sono state fatte su tre specie, ognuna rappresentativa delle principali famiglie abitualmente sottoposte a lavorazione:

- Douglasia (conifera eterogenea)
- Rovere (latifolia eterogenea)

- Faggio (latifolia omogenea)

usando differenti orientazioni della fibratura rispetto al piano di lavoro:

- $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ (nel senso del filo)
- $-0^\circ, -10^\circ, -20^\circ, -30^\circ, -40^\circ, -50^\circ, -60^\circ, -70^\circ, -80^\circ, -90^\circ$ (controfilo)

e differenti tecniche di lavorazione:

- discordanza
- concordanza.

Ogni superficie è stata caratterizzata con diverse tecniche:

- classificazione visuale
- analisi macroscopica (macrofotografia)
- analisi microscopica (stereoscopio)
- analisi SEM
- analisi dei profili

e per ogni processo sono state misurate le:

- forze di taglio in lavorazione.

Dall'ingente mole di dati acquisiti si è cercato di ricavare più informazioni possibili incrociando le diverse tecniche per giungere ad una spiegazione e ad un'interpretazione unificata degli stessi fenomeni. La logica con cui si è operato è la seguente:

- esecuzione di numerose prove preliminari per la determinazione dei parametri ottimali di lavorazione a cui eseguire le prove e familiarizzazione con i difetti e le irregolarità delle superfici
- riflessione e sistematizzazione dei fenomeni generali legati alle irregolarità superficiali, definizione di irregolarità e di difetti
- esecuzione di prove di lavorabilità a differenti angoli della fibratura rispetto al piano di lavorazione su tre specie "rappresentative", stimolo alla comparsa dei difetti intrinseci e misura delle forze di taglio in lavorazione
- analisi visuale dei difetti alla luce dello standard ASTM D1666-87 e suo ampliamento con due nuovi difetti (fibra pressata e fibra embriciata)
- analisi dei difetti per macrofotografia
- analisi dei difetti con stereoscopio
- analisi dei difetti con SEM

- riflessione sulle meccaniche di formazione dei difetti e sviluppo di una nomenclatura e di una classificazione
- analisi sistematica di tutte le superfici delle tre specie sottoposte a lavorazione applicando la classificazione sviluppata e fornendo una mappa della qualità oltreché una mappa di probabilità di trovare il difetto
- analisi dei profili, comparazione della qualità ottenuta con tutti i metodi di lavorazione utilizzati e determinazione dei metodi più adatti, nonché confronto con i dati forniti dall'analisi visuale
- analisi delle forze di taglio e loro interpretazione meccanica alla luce della classificazione delle meccaniche di formazione e delle osservazioni effettuate.

Per ogni superficie si sono eseguite numerose misure con lo scopo di fornire un quadro generale mirato a spiegare in maniera vasta l'origine delle superfici.

8.3 Possibili sviluppi futuri

Gli sviluppi futuri di questa tesi possono essere numerosi e potranno riguardare più linee di ricerca:

- l'approfondimento delle tematiche trattate
- l'uso di queste conoscenze per l'evoluzione di nuove strategie di taglio
- l'evoluzione di prove comparative speditive per la misura ed il confronto della qualità finale nel caso di prove comparative o di lavorabilità

Per quanto riguarda *l'approfondimento delle tematiche trattate* ancora molto lavoro è necessario per arrivare ad una classificazione meccanica rigorosa, e questo rappresenta sicuramente un primo approccio al problema che dovrà essere approfondito in seguito. *L'uso delle conoscenze per l'evoluzione di nuove strategie di taglio* riguarda tecniche evolute per le macchine a controllo numerico. Avendo infatti a disposizione la mappa della qualità per ogni angolo della fibratura e conoscendo l'orientazione del pezzo in lavorazione si può ipotizzare che la macchina sia in grado di modificare i parametri di lavoro e le traiettorie. *L'evoluzione di prove comparative speditive per la misura ed il confronto della qualità finale* riguarda un campo assai diverso, infatti il generare difetti di tipo ed intensità prevedibile ci può permettere di confrontare la qualità di specie diverse e di diverse provenienze. L'esecuzione di una lavorazione circolare può permettere inoltre di studiare in maniera speditiva in un unico manufatto le reazioni che si sviluppano a tutti gli angoli della fibratura e di comparare agevolmente la qualità finale sia utilizzando il metodo visuale sia sviluppando un'apposita procedura per l'analisi dei profili.

Conclusions

Conclusions synthétiques

Ce travail a touché une grande quantité de problèmes et configurations concernant l'usinage du bois. Il est donc difficile d'en donner des conclusions générales très synthétiques. Chaque chapitre concernant des thématiques spécifiques fournit des conclusions qu'il n'est pas nécessaire de résumer ici. Par contre il peut être intéressant d'analyser les aspects généraux de ce travail qui propose un nouveau concept de l'approche de l'usinage du bois. L'analyse du processus de coupe (qui n'est pas une nouveauté), intégrant les aspects anatomiques du bois (qui ne constituent pas une nouveauté), donne de nouveaux outils pour une interprétation "bio-mécanique" du processus de coupe. L'anatomie du matériau est à l'origine du processus de formation de plusieurs défauts. L'analyse de ces comportements micro-mécaniques nous donne la possibilité de remonter à la qualité finale. La compréhension de ces interactions nous donne la possibilité d'intervenir dans le processus même. Une interprétation générale bio-mécanique du processus d'usinage du bois est donc possible, dans une théorie unifiée sur l'origine des surfaces.

Conclusions généraux

Ce travail a étudié sous plusieurs point de vue l'origine des surfaces du bois usinées par outil tournant, étudiant plusieurs techniques d'usinage et techniques d'analyse des surfaces. Les essais ont été conduits sur trois essences, chacune représentative, pour le bois massif, des principales catégories de bois usinées:

- Douglas (conifère hétérogène)
- Chêne (feuillu hétérogène)
- Hêtre (feuillu homogène)

usinant à plusieurs angles du fil par rapport au plan d'usinage:

- $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ (dans le sens du fil)
- $-0^\circ, -10^\circ, -20^\circ, -30^\circ, -40^\circ, -50^\circ, -60^\circ, -70^\circ, -80^\circ, -90^\circ$ (contrefil)

avec différentes techniques d'usinage:

- opposition

- avalant

Chaque surface a été étudiée grâce à différentes techniques:

- classification visuelle
- analyse macroscopique (macro-photographie)
- analyse microscopique (stéréoscope)
- analyse MEB
- analyse des profils

pour chaque usinage nous avons mesuré les:

- efforts de coupe en usinage.

A partir des nombreuses données recueillies, nous avons essayé de donner une interprétation la plus vaste possible des phénomènes de coupe. Nous avons avancé avec la logique suivante:

- achèvement de nombreuses essais préliminaires pour la détermination des paramètres optimaux d'usinage, familiarisation avec les défauts et les irrégularités d'usinage
- analyse et systématisation des phénomènes généraux des irrégularités des surfaces, définition des irrégularités et des défauts
- achèvement des essais d'usinabilité à différents angles du fil par rapport au plan d'usinage dans trois essences "représentatives", impulsion à la formation des défauts et mesure des efforts de coupe en usinage
- analyse visuelle des défauts avec le standard ASTM D1666-87 et introduction de deux nouvelles catégories de défauts (fibres comprimées, fibres retournées)
- analyse par macrophotographie
- analyse par stéréoscope
- analyse MEB
- étude des mécaniques de formation des défauts et développement d'une classification ad-hoc
- analyse des surfaces des trois essences usinées avec la classification développée et étude des défauts et de leur probabilité d'apparition
- analyse des profils, comparaison entre techniques d'usinage et avec les données obtenues par l'analyse visuelle
- analyse des efforts de coupe et leur interprétation mécanique.

Pour chaque surface on a effectué de nombreuses mesures dans le but de fournir un approche générale au problème de l'origine des surfaces.

Possibles avancements futurs

Les perspectives de travail dans le futur peuvent concerner:

- l'étude approfondie des thématiques approchées dans cette recherche
- l'utilisation de ces connaissances pour le développement de nouvelles stratégies de coupe
- l'évolution d'essais rapides pour la mesure de la qualité et sa comparaison.

Pour ce qui concerne l' *l'étude approfondie des thématiques approchées dans cette recherche* il faut encore beaucoup de travail pour arriver à une classification mécanique rigoureuse. L' *utilisation de ces connaissances pour le développement de nouvelles stratégies de coupe* concerne les techniques pilotées par la commande numérique. En connaissant la qualité que l'on peut obtenir pour différents angles du fil et orientations de la pièce, on peut développer des stratégies de coupe intelligentes. L' *évolution d'essais rapides pour la mesure de la qualité ou sa comparaison* concerne la comparaison entre processus et essences. Un usinage circulaire nous permet d'étudier d'une façon rapide tous les angles du fil et de pouvoir mesurer et comparer la qualité obtenue dans la même pièce ou dans des pièces différentes.

Appendice A

SURFACE FORMATION AND QUALITY, IN MOULDING WOOD AT VARIOUS GRAIN ANGLES

Initial results with douglas fir and oak

Abstract: In the framework of a research dealing with quality of machined wood surfaces and analysis of their formation, some tests have been carried on Douglas Fir and Oak, in order to study the surface formation mechanisms at different grain angles, processing against the grain direction, along the grain direction, up-milling and down-milling. Surfaces have been analysed by means of macroscopic analysis, observation with SEM, and profile analysis.

A.1 Introduction

Every species has a different suitability to be processed, depending on its characteristics. In order to understand surface formation process some investigations have been carried on Douglas Fir from French plantation and French Oak, processed at different grain angles. European Douglas Fir is well known to have a huge difference between early- and late-wood, while Oak is a common species for high quality joinery. Many efforts have been made in the late years to understand suitability of many different species to be processed. This work has been undertaken in order to clarify the process mechanisms that characterize the chip formation and the surface formation when machining wood, as a function of the angle between the grain and the working directions. In fact the final surface quality is influenced by many “external” factors, such as the tool settings or machine settings, and by some factors “internal” to the wood, such as moisture content, and mainly grain angle. The available technologies should

allow us to adjust the external factors so that the best quality can be obtained, compatibly with the internal factors. If internal factors are not the optimum for processing, technologies might improve final quality, but not obtain a good quality. To summarize this concept we may say that a piece can be profitably processed by changing the external factors, only if the internal factors, and mainly the grain orientation, allow it. Therefore our research deals with the surface formation process, including measurement of cutting forces and grading of surface quality; however this paper focuses on analysis and interpretation of the surface formation process.

A.2 Materials and methods

A.2.1 The machining process

In order to define the best settings to process the specimens, some preliminary tests have been performed on Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco var. *menziesii*) and Oak (*Quercus robur* L.) at different grain angles, with different depths of cut, feeding speeds and revolutions per minute. Parameters have been chosen in order to give a fast processing compatibly with a good final quality, using the available set-up. We have performed many tests processing “up” and “down-milling” to understand typical defects for both techniques and the more suitable in order to obtain a good final quality. After some investigations the set-up reported in *Tables A.1 and A.2* has been chosen as the more suitable for our tests.

Fixed Parameters
Milling machine: 3 axes CNC router
Wood species: Oak, Douglas Fir
Moisture content: Oak :12,5 % Douglas Fir : 11%
Average specific gravity: Oak: 0,66 g/cm ³ Douglas Fir: 0,45 g/cm ³
Rake angle (α): 20°
Clearance angle (β): 15°
Knives mounted on the cutting head: 2
Knives material: tungsten carbide screwed inserts (HW)
Cutting head diameter: 40 mm

Tabella A.1: Experiment set-up

The size of the specimens has been chosen in order to optimize cutting forces measurements (not analysed in this paper) and to provide a surface large enough for the analysis. The cutting depth has been chosen 0,5 mm because with greater depths the surface quality didn't change significantly, and with this small value the successive surfaces were very close to each other. The wood is cut only by the lateral knives, to avoid undesired disturbances. The specimen is held by two screws and a metal plate compressing the wood, fixed by means of vacuum system. The weight of the whole system was enough to keep it stable, and the vacuum system held it stiffly against the machine table. The grain angle (ξ) has

Variables
Cutting length: 80 mm
Cutting height: 30 mm
Cutting depth: 0,5 mm
Feeding speed: 5 m/min
Rotation speed: 13867 Rev./min
Cutting technique: down-milling, up-milling
Processing: along the grain direction - against the grain direction

Tabella A.2: Experiment set-up

been changed from 0° to 90° by progressive increments of 10° . The “-” before the angle value means that the surface has been processed against the grain direction. The presence of “ 0° ” and “ -0° ” and of “ 90° ” and “ -90° ” means that the same surface has been processed after being tilted by 180° . This, i.e. processing in the two opposite directions, was done in order to verify (if the same final quality and the same profile were obtained respectively for $0^\circ/-0^\circ$ and $90^\circ/-90^\circ$) that the grain direction was really perpendicular (for grain angle -90° and 90°) or parallel (for -0° and 0°) to the processing plane: moreover this was an indication, although limited, of the repeatability of the test. We used specimens with annual rings oriented so that a radial face is processed, in order to avoid the alternating of early- and late-wood; consequently the surface quality results from processing early- and late-wood separately, with no interaction between the two. See *Figure A.1*.

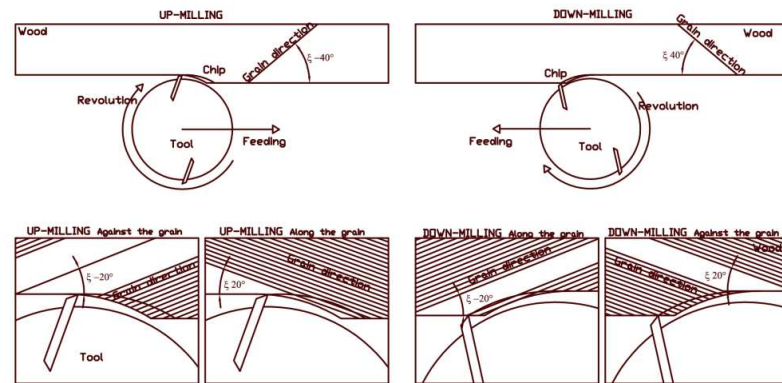


Figura A.1: The four main experimental conditions.

A.2.2 Observation with SEM

The machined surfaces have been observed with SEM (a Joel Scanning Electron Microscope), in low-vacuum mode, with no previous treatment of samples.

A.2.3 Profile measurement

Profiles have been analysed by means of a profile measurement device, in order to give an objective way of comparison between processed surfaces. The quantitative results can easily be plotted; moreover, the presently available standards (such as the ASTM standard *D-1666-87*, which is based on a limited number of visually detectable defects) do not provide methods for evaluating machining defects on surfaces processed with down-milling technique. The measurements set-up is described in *Table A.3*.

Device	2D Profilometer
Sensor	Stylus
Measurement type	2D
Stylus tip radius	10 μm
Transducer's range	+/- 5 m
Measuring length	25 mm
Measuring speed	1 mm/sec
Shape filter	Linear
Acquired parameters	Pa, Pt

Tabella A.3: Profile measurement system set-up.

Pa is the integral of the profile divided for the profile length and Pt is the difference between the highest peak and the deepest valley in the profile length.

A.3 Results

Surface quality evolution with grain angle and with different cutting techniques (up- and down-milling) is the main topic of this paper. Surface quality will be examined and compared by means of macroscopic, SEM, and profile analysis. By macroscopic analysis we will just present the main defects arising on the surfaces processed by down-milling technique; SEM analysis allows a clear view of the machining defects and of how they diversely occur in early- and late-wood; profile analysis allows objective evaluation of the final quality of processed surfaces, as a function of the examined parameters.

A.3.1 Macroscopic analysis

Figure A.2 shows some macro photographs of the main defect (which could provisionally be named “tilted grain”) arising from processing with down-milling technique; this severe defect characterises the surfaces processed against the grain, in the range from 30 to 80°, for both the examined species. In facts, during the cutting process, the wood tissues are compressed and subsequently tilted during the tool revolution. The tilting “axis” is under the surface, and the defect affects the whole surface (only the latewood in Douglas Fir, all wood in Oak), producing a very bad final quality.

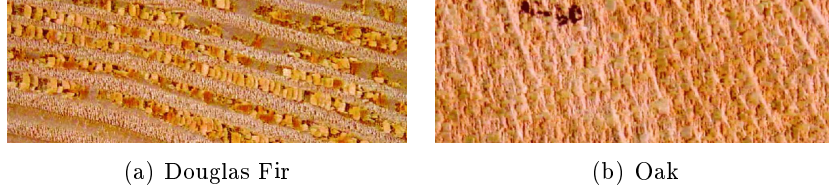


Figura A.2: Douglas Fir (-40°) and Oak (-60°) processed with Down-milling technique.

A.3.2 Analysis with SEM

All the SEM images are taken at x50.

Douglas Fir

Douglas Fir shows frequently defects arising from the great difference (mostly in density) between early- and late-wood: the two types of wood have a very different mechanical behaviour.

Up-milling technique is the “normal” processing technique for solid wood. Many of the defects considered by ASTM *D-1666-87* occur on these surfaces. Processing **along the grain** we obtained a good quality until 20° , even if a great difference between early- and late-wood is obvious; whereas the late-wood always shows a fairly good surface quality, the following behaviour (see *Figure A.3*) can be observed in the early-wood: as the angle increases up to 60° some wood particles are torn away with a conchoidal fracture (i.e. form a cavity having a conchoidal shape), while from 70° to 90° wood particles are torn away, without showing a conchoidal fracture. Possibly this behaviour could be explained by analysing the compressive component of the knife edge at the beginning of the cut, as related to the slipping planes of wood; however, the subject is too wide to be discussed here.

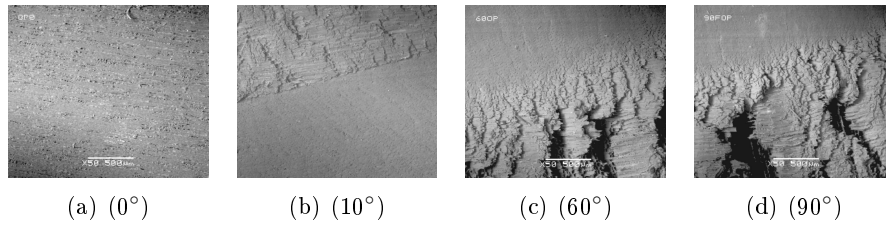


Figura A.3: Douglas Fir processed UP-milling, along the grain.

Processing **against the grain**, the wood particles tend to be torn away. For small angles the occurrence of torn grain is limited, and fuzzy grain is formed in the early-wood. Increasing the grain angle wood particles are torn away up to $-80^\circ/-90^\circ$ where the early-wood is completely torn away, whereas the late-wood still keeps good conditions.

DOWN-milling technique is not used in processing solid wood, in facts as we easily see comparing *Figures A.3* and *A.5*, the final quality is worse than processing Up-milling. In this case, processing against the grain we observe

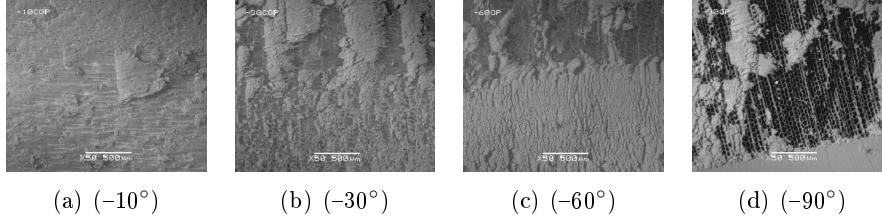


Figura A.4: Douglas Fir processed UP-milling, against the grain.

the formation of the above mentioned “tilted grain”, not included in ASTM *D-1666-87*, that greatly affects the surface quality (see *Figure A.3*). Processing **along the grain**, quality is not far from Up-milling, for narrow angles fractures in the early wood begin earlier than Up-milling (since 10°) but for high grain angles the compression before the cut allows torn parts in early wood of smallest dimensions than in Up-milling. Anyway the quality continue to be very poor. (see *Figure A.5*).

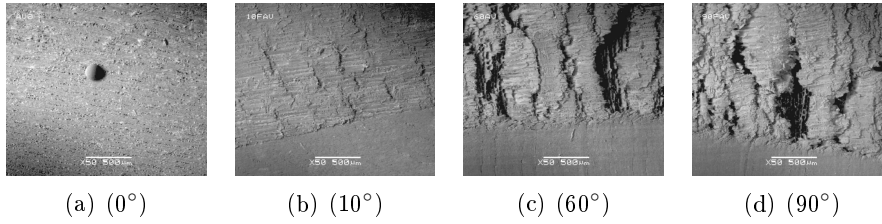


Figura A.5: Douglas Fir processed DOWN-milling, along the grain.

Processing **against the grain** the “tilted grain” occurs, depending on the fact that the wood is compressed before cutting, so the cut is more difficult. Large wood particles are broken deep under the surface and tilted, causing a vary bad final quality (see *Figure A.6*). This defect occurs from -30° until -80°. For -10° and -20° fuzzy grain persists, even if its formation and aspect are different from the Up-milling process.

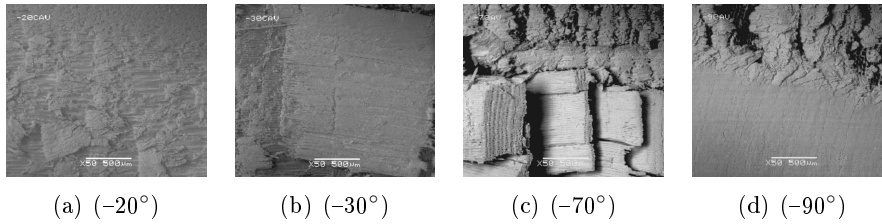


Figura A.6: Douglas Fir processed DOWN-milling, against the grain.

Oak

Oak has a narrow density variation within the rings, for this reason we obtain a more homogeneous behaviour of the wood. The different density plays anyway an important role inside the ring, and the presence of large vessels sometimes

seems to be a problem. Also for Oak we processed a radial face, in order to avoid interactions between early- and late-wood. As for Douglas Fir, great differences arise processing in different ways, hereafter the main defects are reported and briefly discussed.

UP-milling: as can be seen from *Figure A.7* the aspect is very different from Douglas Fir but the role of the density is well visible. Processing **along the grain** often carries a good quality. For narrow angles ($10^\circ/20^\circ$), while processing, the vessel wall is pushed inside the vessel itself, and comes back above the surface level after the tool has passed. This defect is really unpleasant from a tactile point of view. Increasing the grain angle the parts characterised by a lower density show torn fiber and irregularities, while the more dense parts have always a good aspect.

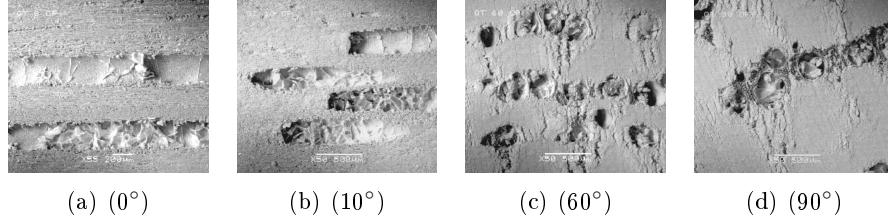


Figure A.7: Oak processed Up-milling, along the grain.

Processing **against the grain** at narrow angles ($10^\circ/20^\circ$) the vessel walls tend to be torn, whereas along the grain they were compressed, so the vessels are sharply cut, carrying an excellent final quality. Increasing the angle, torn parts become more important, but never too serious, especially for the denser parts.

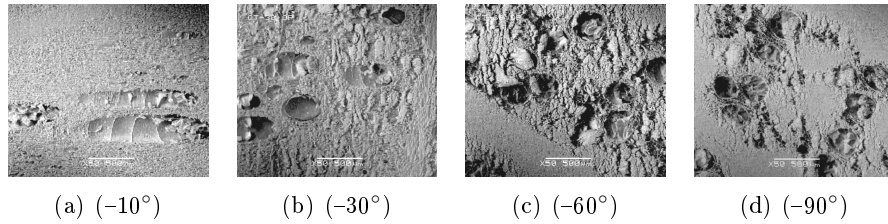


Figure A.8: Oak processed Up-milling against the grain.

When **Down-milling along the grain** the final quality is very close (as for Douglas Fir) to the quality obtained by Up-milling. For narrow angles we have the same behaviour as for Up-milling; for greater angles torn parts become more important, especially in early wood, even if, as for Douglas Fir, for large angles the pre compression carries a decrease of torn parts (see *Figure A.9*).

Processing **against the grain**, “tilted grain” become the main defect and is the one who characterise the surface. Oak has a more homogeneous density, so the defect occurs on both early- and late-wood affecting heavily the final quality of the surface. For narrow angles ($10^\circ/20^\circ$) the quality is good and the vessels are sharply cut, at 30° the defect occurs, affecting the surface until 80° and occasionally also at 90° (see *Figure A.10*).

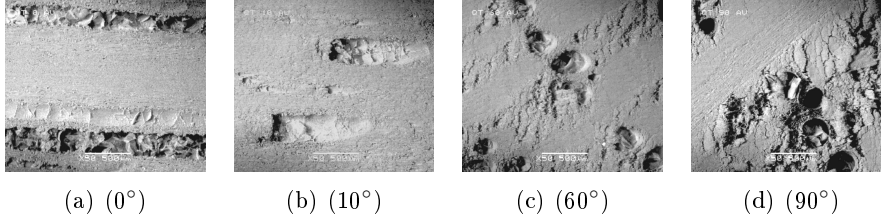


Figura A.9: Oak processed Down-milling, along the grain.

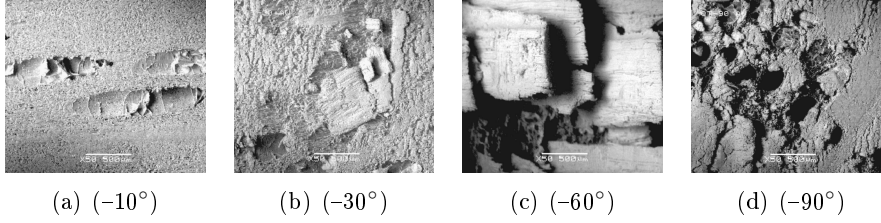


Figura A.10: Oak processed Down-milling, against the grain.

A.3.3 Profile analysis

Here follows a comparison of profile parameters for the two species and for the different cutting techniques and grain angles. The evolution of $\mathbf{Pa}$ and $\mathbf{Pt}$ for different species, cutting techniques and grain angles is very clear. For the analysis we chose to use the primary profile (i.e. the measured profile, after nominal shape has been subtracted), because a) roughness and waviness analysis are not necessary when the profile characteristics are so obvious, and b) it would be difficult to correctly set the filtering without negatively affecting some of the measurements; from the measured profile, the parameters $\mathbf{Pa}$ and $\mathbf{Pt}$ have been computed; $\mathbf{Pa}$ is plotted, whereas $\mathbf{Pt}$ is reported in tables just to give an idea of the maximal irregularity of the surface.

Douglas Fir

When **Up-milling** the profiles are not very different between processing “along” and “against” the grain, since in both cases some defects occur: against the grain, wood particles are torn away, whereas along the grain the above mentioned conchoidal fractures occur. *Figure A.11* and *Table A.4* show that as the grain angle increases, the surface quality (expressed by means of $\mathbf{Pa}$ parameter) decreases.

However, for $\xi=10^\circ$ and 20° $\mathbf{Pa}$ is larger when processing along the grain, although by visual examination this surface would be graded as better; these larger values of $\mathbf{Pa}$ possibly occur because of the different elastic behaviour between early- and late-wood (after the passage of the knife early-wood rises above the surface forming bumps). It should therefore be noted that within this range ($\xi=10^\circ$ and 20°) $\mathbf{Pa}$ is not a good indicator of the surface quality, when processing Douglas Fir along the grain with up-milling technique.

After 20° processing against the grain produces worse surfaces than along

the grain, with the exception of -70° . Pt shows large irregularities (up to $\sim 0,52$ mm), which are greater when processing against the grain.

We may conclude that processing along the grain typically provides better surfaces than processing against the grain (the anomalous value at 70° has not yet been examined in depth). Such conclusion is supported by both the macroscopic examination and the Pa values (disregarding for this purpose the above mentioned anomalous values of Pa for $\xi=10^\circ$ and 20°).

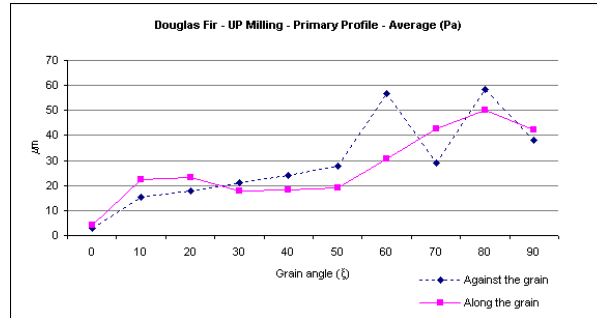


Figura A.11: Pa values when processing Douglas Fir with Up-milling technique.

Grain	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Along	46	111	154	107	195	183	288	333	353	400
Against	36	216	149	190	362	215	520	233	472	458

Tabella A.4: Pt values when processing Douglas Fir with Up-milling technique (values are reported in μm).

Figure A.12 and Table A.5 show clearly how the “tilted grain” becomes important for surface quality when processing by **Down-milling**: at -30° , where the defect become obvious, Pa increases rapidly, then decreases between -50° and -60° , where the surface quality increases, and again increases in the $-70^\circ/-80^\circ$ range.

Pt values indicate that the difference between the highest peak and deepest valley may arrive to $\sim 1,15$ mm, thus showing the great irregularity of the surface.

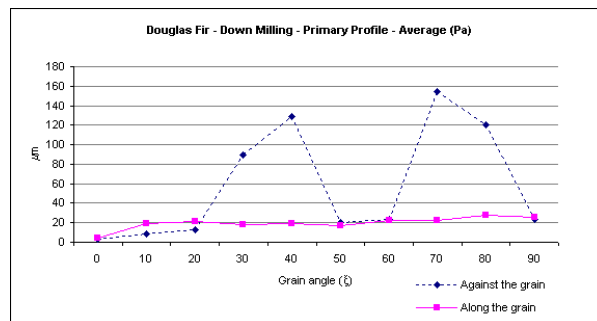


Figura A.12: Pa values when processing Douglas Fir with Down-milling technique.

Grain	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Along	42	96	120	181	188	198	234	269	299	302
Against	36	121	150	491	837	258	279	1168	876	198

Tabella A.5: **Pt** values when processing Douglas Fir with Down-milling technique (values are reported in μm)

The whole data sets are plotted together in *Figures A.13* and *A.14*, which show that processing against the grain always provides worse surfaces than processing along the grain, and that Down-milling always provides worse surfaces than Up-milling.

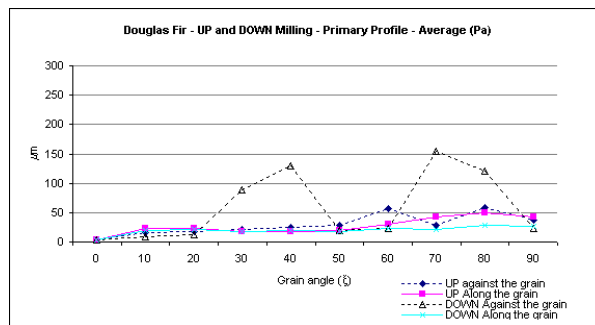


Figure A.13: Comparison between **Pa** in processing Douglas Fir with Up- and Down-milling.

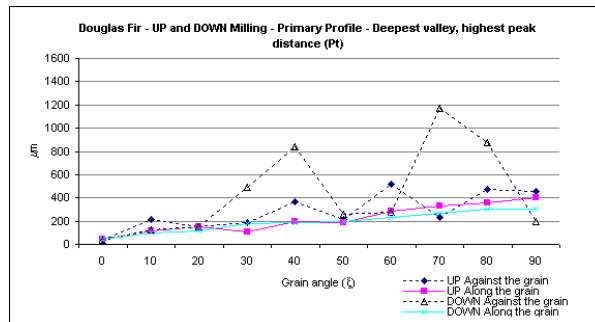


Figure A.14: Comparison between **Pt** in processing Douglas Fir with Up- and Down-milling.

Oak

Figure A.15 and *Table A.6* clearly show that the surface obtained by **Up-milling** against the grain is worse than the one obtained with the same technique, but along the grain; however, the difference is not very large and final quality is not very distant.

Pt shows no great irregularities ($\sim 0,27$ mm), due to the homogeneity of the surface and the high wood density which allow a neat cut to occur (note that this is only true for radial surfaces).

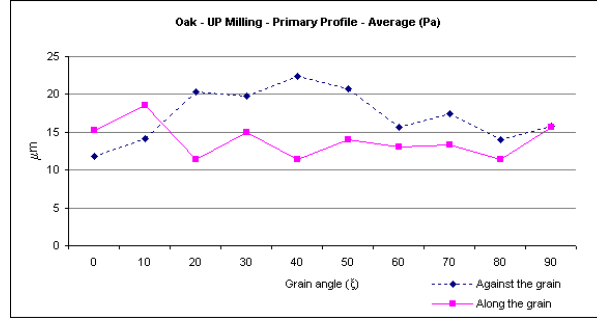


Figura A.15: **Pa** values when processing Oak with Up-milling technique.

Grain	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Along	182	193	187	210	247	216	276	243	233	237
Against	210	187	217	225	272	236	182	274	200	218

Tabella A.6: **Pt** values when processing Oak with Up-milling technique (values are reported in μm .)

Analysing profiles of surfaces processed by **Down-milling** against the grain, we can easily see how the “tilted grain” defect becomes important for surface quality, in Oak as in Douglas Fir. *Figure A.16* and *Table A.7* show that at -30° **Pa** begins to grow up and rapidly increases until -80° ; as with Douglas Fir there is a small decrease at -60° .

Pt values shows that the difference between the highest peak and deepest valley may reach $\sim 1,51$ mm, which is the worst value obtained until now.

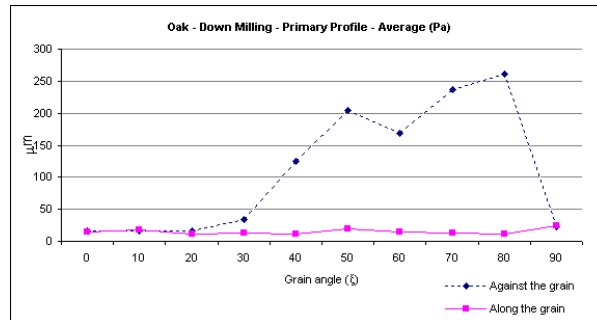


Figura A.16: **Pa** values when processing Oak with Down-milling technique.

Grain	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Along	208	231	198	201	195	240	229	261	179	315
Against	205	211	187	246	835	1238	1156	1514	1172	263

Tabella A.7: **Pt** values when processing Oak with Down-milling technique (values are reported in μm).

The whole data sets are plotted together in *Figures A.17* and *A.18*, which show that processing against the grain always provides worse surfaces than pro-

cessing along the grain, and that Down-milling always provides worse surfaces than Up-milling.

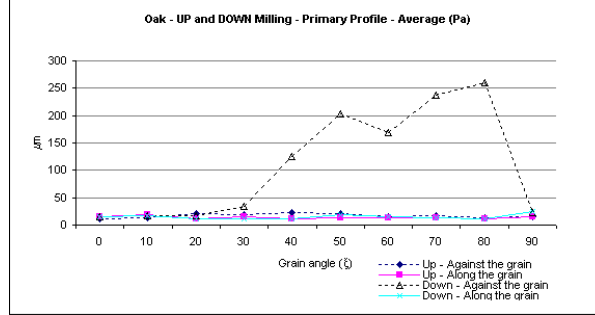


Figure A.17: Comparison between **Pa** in processing Oak with Up- and Down-milling.

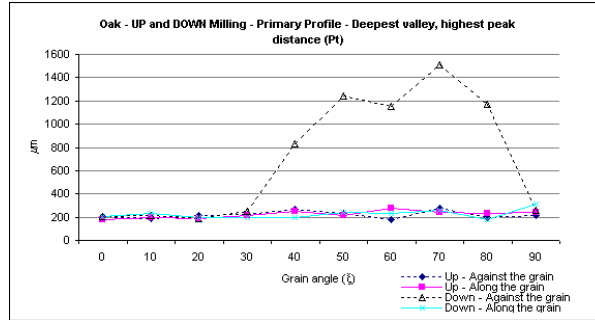


Figure A.18: Comparison between **Pt** in processing Oak with Up- and Down-milling.

A.4 Conclusions

Douglas Fir with moisture content of $\sim 11\%$ and Oak with moisture content of $\sim 12,5\%$ have been characterized concerning wood processing with “up” and “down”-milling techniques at various grain angles. The surfaces have been examined by macroscopic analysis and observed with SEM, and profiles have been measured, processed and compared. The main results of this research may be summarized as follows.

1. Douglas Fir shows a different behaviour between early- and late-wood, and between processing along the grain and against the grain. The surface quality decreases as the grain angle increases, and the surfaces processed along the grain are typically better than those processed against the grain.
2. Douglas Fir processed along the grain with Up-milling technique provides similar results as with Down-milling, in terms of final quality. Up-milling is better for small grain angles (conchoidal fractures are less frequent), while Down-milling is better for large grain angles (tendency to generate torn wood particles in the early-wood is smaller). Late-wood typically shows a good final quality.

3. Douglas Fir processed against the grain by Up-milling provides much better surfaces than by Down-milling. Processing by Down-milling produces a defect not considered by the ASTM D-1666-87 standard. We called “tilted grain” this defect, which significantly affects the final surface quality.
4. Oak shows a different behaviour (however, smaller than Douglas Fir) between early- and late-wood, and between processing along the grain and against the grain. The surface quality decreases as the grain angle increases, and the surfaces processed along the grain are typically better than those processed against the grain.
5. Oak processed along the grain with Up-milling technique provides very similar results as with Down-milling, in terms of final quality. However the following minor defect (producing an unpleasant tactile effect) often occurs: the vessel wall is pushed inside the vessel itself, and comes back above the surface level after the tool has passed.
6. Oak processed against the grain by Up-milling provides much better surfaces than by Down-milling. Processing by Down-milling produces a defect not considered by the ASTM D-1666-87 standard. We called “tilted grain” this defect, which significantly affects the final surface quality. For narrow grain angles (-10° , -20°) the surface quality is high and the cut very sharp.
7. For both species the worse surface quality occurs by Down-milling against the grain; the second worse occurs by Up-milling against the grain. Processing along the grain produces similar quality for both Up- and Down-milling.
8. Up-milling is typically the best technique for machining solid wood.

A.5 Bibliography

1. Negri M, Goli G. 2000; Qualità delle superfici lavorate del legno di Abete rosso e di Douglasia valutata con una opportuna classificazione visuale, Legno Carta e Cellulosa, VI(1):10-21.
2. Precision Devices, Inc.; Surface Metrology Guide, web address: <http://www.predev.com/smg>.
3. Cyra G., Tanaka C. 2000; The effects of wood-fiber directions on acoustic emission in routine, Wood Science and Technology 34 (2000) 237-252.
4. Loehnertz S. P., Vazquez Cooz I. 1998; Sawtooth Forces in Cutting Tropical Hardwoods Native to South America, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-567.
5. ASTM D-1666 1987; Standard methods for Conducting Machining Tests of Wood and Wood-Base Materials, Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.09 Wood: 257-276.

6. Goli G., Bleron L., Marchal R., Uzielli L., Negri M. 2002; Measurement of cutting forces, in moulding wood at various grain angles. Initials results with Douglas Fir. To be published in the Proceedings of the Conference: Wood science and engineering in the third millennium – Brasov (RO) – November 17-18th 2002.

Appendice B

MEASURING OF CUTTING FORCES IN ROUTING WOOD AT VARIOUS GRAIN ANGLES Study and comparison between up- and down-milling techniques, processing Douglas fir and Oak

Abstract: In the framework of a research dealing with surface quality and surface formation mechanics some specimens of Douglas fir and Oak have been routed at different grain angles with a 3-axis routing machine, with up- and down-milling techniques. Cutting forces have been measured by a tri-axial dynamometric platform, an interpretation of their behaviour is proposed and the different processes have been studied and compared. The results of our study show the behaviour of parallel and normal force, as an influence of the grain angle, and give a geometrical explanation. Comparison of data from up- and down-milling shows how cutting forces are influenced by cutting geometry, and consequently the main differences between these two techniques. Data of Douglas fir and Oak are compared as well two different depths of cut for Douglas fir.

B.1 Introduction

In wood machining it is well known that the final quality depends on many factors. One of the main factors is the grain direction. In facts processing “with” or “against the grain” provides really different cutting conditions. The grain direction has an important role on the cutting mechanics because of the different mechanical properties of wood in the different sections. These interactions depend on many factors, “internal” or “external” to the wood. In our

case every factor has been kept constant, in order to establish the role of the grain angle. A complete work of surface characterisation has been done, trying to understand the surface formation mechanics [Goli et al. 2002(7)], the surface final quality [Goli et al. 2002(8)], the cutting forces and the chip formation and typology according to different milling techniques (-up and down-milling), wood species and cutting depths. A unifying approach to surface quality depending to the grain direction seems to be possible.

B.2 Materials and methods

B.2.1 The machining process

In order to define the best settings to process the specimens, some preliminary tests were performed. Douglas fir has been processed at different grain angles, with different depths of cut, feeding speeds and tool revolutions per minute. The specimens were equilibrated at an average moisture content of 13,2% for Douglas fir and 12,6% for Oak (see *Tables B.1, B.2, B.3*). The other parameters has been chosen in order to obtain a fast processing and a good final quality, with the available apparatus. We performed many tests processing “up-” and “down-milling”, in order to identify the most suitable technology and to analyse the cutting forces in the two processes, and a complete test has been conducted for Douglas fir (with a depth of cut of 0,5 mm and 1,5 mm) and Oak. After some investigations the set-up reported in the *Tables B.1, B.2, B.3*.

Parameters imposed
Milling machine: 3 axes CNC router
Wood species: Oak, Douglas Fir
Rake angle (α): 20°
Clearance angle (β): 15°
Knives mounted on the cutting head: 2
Knives material: tungsten carbide screwed inserts (HW)
Cutting head diameter: 40 mm

Tabella B.1: Experimental set-up adopted for the tests.

Cutting parameters
Cutting length: 80 mm
Cutting height: 30 mm
Feeding speed: 5 m/min
Rotation speed: 13867 Rev./min
Cutting technique: down-milling, up-milling
Processing: along the grain direction - against the grain direction

Tabella B.2: Experimental set-up adopted for the tests.

The length of the specimen has been chosen in order to be held within the dynamometric platform borders, and its height in function of the tool edge

Species characteristics	Douglas Fir	Oak
Wood moisture content:	13,2% ~	12,6% ~
Average specific gravity:	0,43 g/cm ³	0,66 g/cm ³
Cutting depth:	0,5 - 1,5 mm	0,5 mm

Tabella B.3: Experimental set-up adopted for the tests.

length. The cutting depth has been chosen in 0,5 and 1,5 mm for Douglas fir and in 0,5 mm for Oak. The wood was shaped in order to avoid a contact with the top of the tool (only lateral contact), to avoid undesired disturbances in the measures. The specimen is held upon the dynamometric platform by two screws and a metal plate compressing itself. The dynamometric platform is fixed by four screws on a rectified steel plate, tightly held to the machine table by a vacuum system. The weight of the whole system was enough to keep it stable, and the vacuum system held it stiffly against the machine table. The grain angle (ξ) were changed from 0° to 90° with progressive increments of 10° . The use of the “-” before the angle value means that the surface has been processed “against the grain direction” otherwise the surface has been processed “with the grain”. The presence of ‘ 0° ’ and ‘ -0° ’ and of ‘ 90° ’ and ‘ -90° ’ means that the same surface has been processed after being tilted by 180° . This, i.e. processing in the two opposite directions, was done in order to verify the suitability of the measure, that in both cases should have the same value. We used specimens with annual rings oriented so that a radial face is processed, in order to avoid the alternating of early- and late-wood, consequently the surface quality results from processing early- and late-wood separately, with no interaction between the two, and cutting forces will not be affected by their alternation.

B.2.2 Cutting forces measurement and acquisition

The measurement of cutting forces during a routing process is a quite complicate operation because of the high frequency and the periodical solicitation that excite the system to vibrate according to its natural frequency. Moreover a machine with more axis produce lots of vibrations affecting the signal. For this reason we reduced as much as possible the mass handing over the platform. The measuring system is a tri-axial dynamometric piezoelectric platform, connected to three charge amplifiers switched to “long” modality. We measured cutting forces along the tree axes, therefore only two of them (X and Y) are analysed in this paper. Data have been collected, stored and analysed by an acquisition board and the means of the computer analysis. The set up is reported in *Table B.4*.

The forces are oriented as follows: the “parallel force” is oriented along the feeding direction and has its positive versus in the cutting direction; the “normal force” is oriented perpendicularly to the feeding direction and its verse is positive going inside the surface. Both parallel and normal force are in the same horizontal plane.

Measuring system	Tri-axial dynamometric piezo platform
Platform cut-off frequency	3000 Hz
Acquisition device	Computer board
Anti alias filter	Mechanical
Sampling frequency	10.000 Hz

Tabella B.4: Acquisition system set-up.

B.2.3 Cutting forces analysis

The measurement of cutting forces during processing is always difficult, because of the interferences brought by all the vibrations affecting the system. The signal is often difficult to analyse, and to retrieve cutting forces is a really complicate operation. For this reason it has been necessary to operate an important filtering. By a side filtering very much would affect the data, but at the same time would clean them from useless noise. Even if filtered data do not represent exactly cutting forces, they are easy to analyse and to process and not far from real cutting forces (anyway closer than with noise). For this reason a filter type Butterworth of 4th order set as low-pass at 500 Hz, has been used to clean the data from noise. Considering that 500 Hz is bigger than cutting frequency (462 Hz) we should not significantly affect the signal, and the embedded data. The cutting conditions are reported in *Table B.5*.

Cutting head revolution frequency	231 Hz
Time to make a revolution	0,0043 sec
Cutting frequency (2 edges)	462 Hz
Time between two chips	0,0022 sec

Tabella B.5: System periodicity.

and the analysis condition are set in *Table B.6*.

Filter Frequency	500 Hz
Order	4th
Type	Low-pass

Tabella B.6: Analysis conditions.

The domain analysed is always the time and we use the normal time-intensity graph and the autocorrelation function (autocorrelation is a function that allow us to retrieve the periodicity of a system).

Here follows some examples of the collected data and of the performed analysis. On the X axis for both signals is reported the “Time”, while on the Y axis directly the force in “Newton” for time-intensity analysis, and an index going from 1 to -1 (1: perfectly correlated, -1: anti-correlated) for the autocorrelation function. The first test we have done is to verify the absence of noise while the machine was moving but not processing (see *Figures B.1(a)* and *B.1(b)*). In the graphs the X has to be red as “normal force” and the Y as “parallel force”.

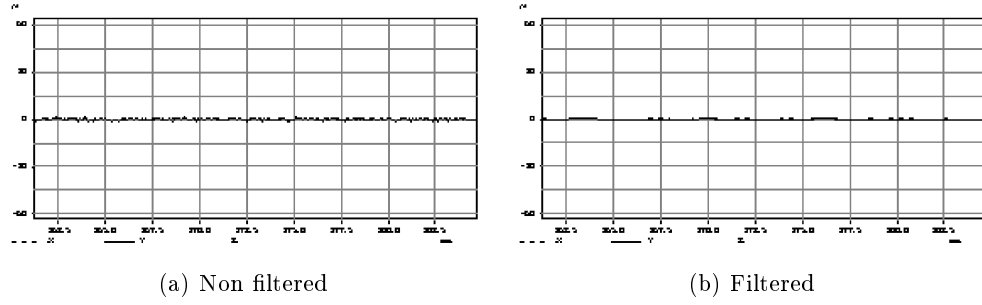


Figura B.1: Filtered and non filtered signal while the machine is moving without processing wood (idle).

Once verified the absence of significant noise, we began the analysis of the signals acquired while processing. The filtered and non filtered signals look like in *Figures B.2(a)* and *B.2(b)*. As can be easily seen, valleys have a slightly different value in the two cases (filtered and non-filtered), but if the non-filtered signal contains the information we are seeking, it has too much noise to be clearly read. Filtered signal, even if not exactly representing the cutting forces, is very well correlated to them. For this reason we have chosen to analyse this one.

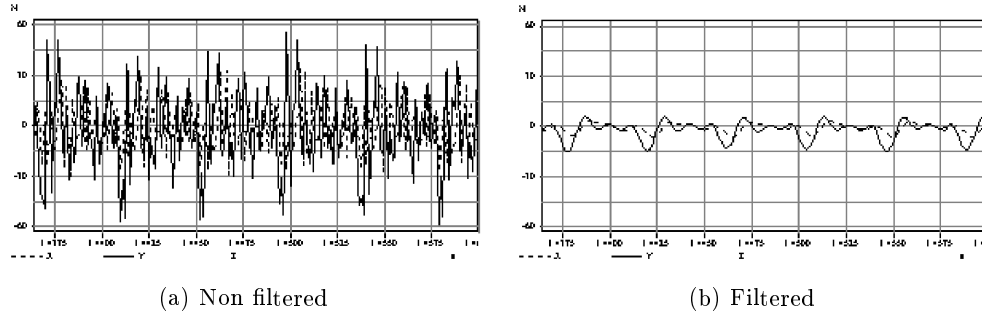


Figura B.2: Filtered and non filtered signal while the machine is moving and processing a specimen with $\xi 20^\circ$.

The analysis of the autocorrelation function while the machine is moving but not processing doesn't show any particular periodicity, while processing we can easily see the periodicity of the function. The distance of the first peak from the zero is 0,0043 sec., exactly the time necessary for a revolution (see *Figures B.3(a)* and *B.3(b)*).

Here follows a deeper analysis of time and autocorrelation functions for a specimen processed in the grain direction with a grain angle of 60° .

The acquired signals, in the time domain, change of intensity depending on the grain direction, but the shapes are very near (see *Figure B.4*). As expected the main force is the "parallel force" (represented as Y). By this plot appears manifest the periodicity of the function. The time elapsed in a cycle (represented by the cursors position) was measured in 0,0043 sec., it means that every cycle in the graph corresponds to a revolution of the tool. In our process we have two

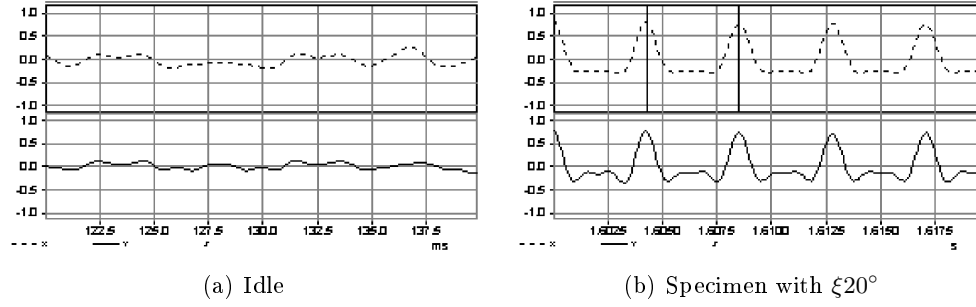


Figura B.3: Autocorrelation of filtered signal processing idle and processing a specimen with a grain angle of 20° .

tools involved, and it means that a tool does not cut. As known when more than one edge is involved in the cut, one cuts more than the others, but in this case the cutting of the second edge is not visible at all.

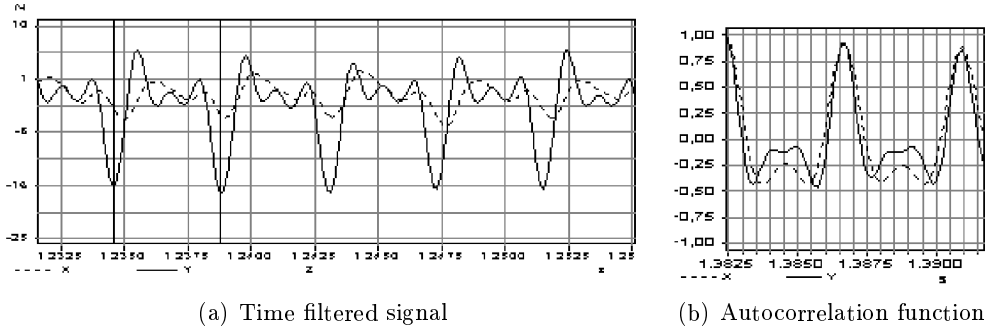


Figura B.4: Filtered signal and its autocorrelation function processing a specimen with a grain angle of 60° .

To determine the cutting forces during the process, we measured the deepest valley consequent of an impact in the filtered signal. We have done 15 measurements, and after we have done an average to determine the cutting forces. This operation is possible because of the extreme regularity of the signals, as can be seen from the Standard Deviation reported in *Table B.7*.

S.D.	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
X - up-mill - with gr.	0,6	0,7	0,7	2	0,9	1,8	0,8	0,5	1,0	1,7
Y - up-mill - against gr.	0,3	0,6	0,9	0,7	0,7	0,7	0,5	1,0	0,5	0,9
X - down-mill - with gr.	0,4	1,0	0,4	1,5	0,6	1,1	1,8	0,2	0,4	0,8
Y - down-mill - against gr.	0,4	0,4	0,6	0,3	0,4	0,4	0,5	0,9	1,2	0,4

Tabella B.7: Standard deviation in measured cutting forces.

B.3 Results

General results has been drawn about up- and down-milling techniques, analysing the cutting forces measured for Douglas fir processed with 0,5 mm of depth of cut. These results have been compared with the results obtained processing Douglas fir with a depth of cut of 1,5 mm and Oak with a depth of cut of 0,5 mm. Finally all the data are observed and analysed together. In the graphs where grain angle is reported from 0° until 90° it is marked if the data concern the forces processing “with the grain” or “against the grain” (0/90 graphs). For the graphs going from -90° to 90° the negative angle concerns the values measured processing against the grain, while the positive one concerns the data obtained processing with the grain. The 0° means that the specimen has been processed at straight grain.

B.3.1 Processing up-milling

With this technique the main points are that the blade moves upward during the cut and that the blade while processing moves in the direction where the surface have yet to be processed (down milling is the contrary) beginning to cut the chip from the thinner part. As first we can remark that the parallel force is always increasing from 0° until 90° , while for the normal force we can see some non linear evolutions. Moreover we can observe that the parallel force (as expected) is always bigger than the normal force and this one is always bigger processing with the grain than against the grain. This behaviour is because processing in the grain direction the tool exert a cross-compression that makes the cut harder. Processing against the grain in general produce cross-tension that leads to an easier cut. For the variations in the normal force, studying geometrically the problem we can calculate some significant angles in the process. Processing in the gain direction “ 20° ” is an important angle because the grain direction is perpendicular to the rake face. This should lead to an increase of cutting forces because as explained the cut is harder if exerted for cross-compression. Processing against the grain an important angle is “ -70° ” because the grain is parallel to the rake face leading to a cutting forces decrease because the cut (often the chip processing against the grain is not cut but broken) happens for cross-tension. These two theoretical angles should vary of some degrees because the maximal force is not exerted in the point of tangency between the surface and the tool but after that the cut has began and the chip has increased his thickness. These two points can be easily seen observing the normal force behaviour in *Figure B.5* where the maximum processing with the grain is at 30° , while the minimum processing against the grain is located at -70° . The same data are plotted in *Figures B.5(a)* and *B.5(b)*.

B.3.2 Processing down-milling

With this technique the main points are that during the cut the blade moves downward and in the direction where the surface have already been processed, beginning to cut the chip from the thicker part. With this technique for both

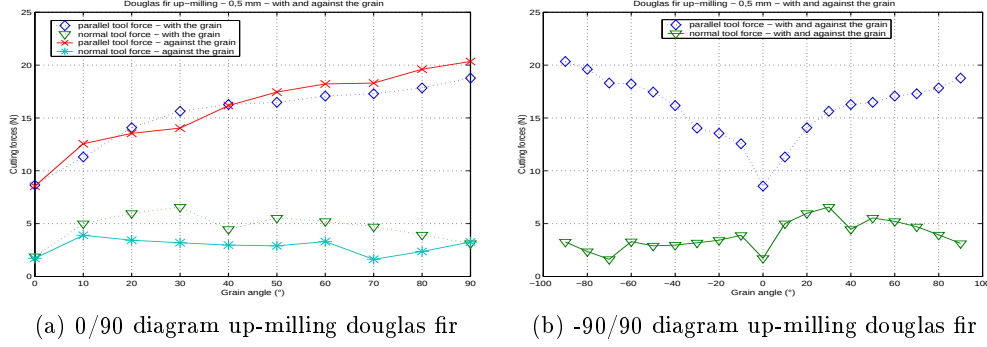


Figura B.5: 0/90 (a) and -90/90 (b) diagrams of cutting forces up-milling Douglas fir with 0,5 mm of depth of cut.

parallel and normal force we can see some non linear evolutions changing the grain direction. Moreover we can say that the parallel force (as expected) is always bigger than the normal force and this one is always bigger processing with the grain than against the grain. This behaviour can be explained as for up milling technique. For the variations in the force magnitude we can give the same explanations given for up-milling but everything is transposed of -20° (the maximum in 30° up-milling down-milling is at 10° , and the minimum in -70° up-milling, down-milling is in -90°), the reasons will be explained in the next paragraph. The same data are plotted in *Figures B.6(a)* and *B.6(b)*.

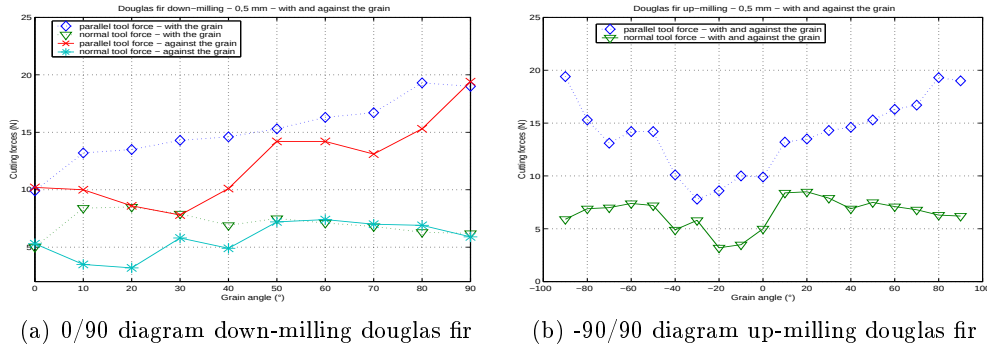


Figura B.6: 0/90 (a) and -90/90 (b) diagrams of cutting forces down-milling Douglas fir with 0,5 mm of depth of cut.

The great slope in parallel force processing down milling is because of the presence of a particular defect, called tilted grain by the authors (see *Figure B.7(b)*). In this defect wood layers are broken for cross-tension and tilted. The normal force, as the parallel one are low because as well known wood cross-tension properties are very week.

B.3.3 Comparison between processing up- and down milling

Comparing up- and down-milling (see *Figure B.7*) we can easily observe that processing with the grain, the parallel force shows values that are very close,

while processing against the grain the down-milling values are in general lower than those measured up-milling. This is because of the cited defect “tilted grain” that set up only with down-milling technique. About the normal force we can see that down-milling is always higher than up milling, this is because with the down-milling technique the cut starts from the thicker part and the motion is downward. A very important particular to note is that the shapes of up- and down-milling diagrams are very similar, but for the down milling forces the diagrams are shifted 20° on the left. This is explainable by the different geometry cutting up and down milling. The different cutting geometry (upward and downward motions) results in a different evolution of the angle between the grain direction and the rake face, that only in the tangent point with the new surface results to be the same (see *Figure B.8(a)*).

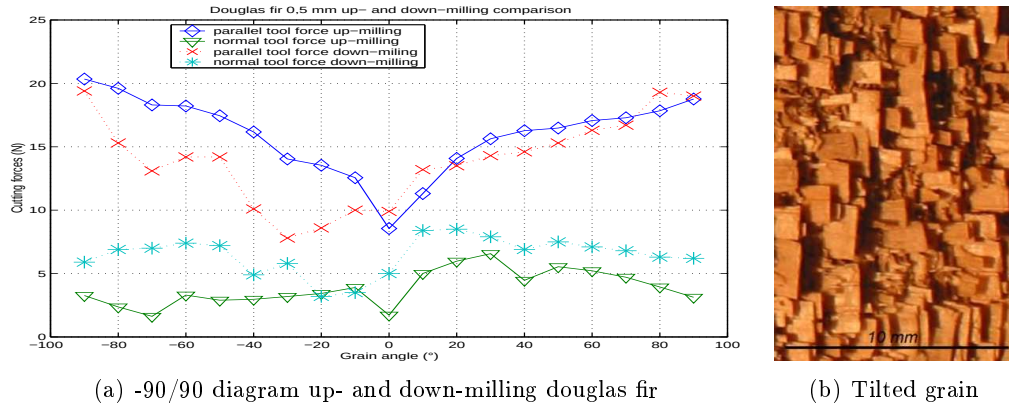


Figura B.7: -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir with 0,5 mm of depth of cut (a). The defect called “tilted grain” (b).

As shown in *Figure B.8* (the image is in scale with the real process) an angle of 20° is held between the impact point processing down-milling and the getting out of the edge processing up-milling with a cutting depth of 0,5 mm (the angle between the two points is 22°). Probably in this point the chip is thick enough to oppose a reaction, and this difference shifts the down milling diagrams of -20° as regards up milling ones because of the difference in relative orientation between the rake face and the grain direction.

The same thing can be observed in Douglas fir processed at 1,5 mm of depth of cut (see *Figure B.9(a)*) and Oak processed at a depth of cut of 0,5 mm (see *Figure B.9(b)*) where the differences are connected to the formation of tilted grain. This proves that the same mechanical reactions are engaged in the processes and that cutting forces are strictly connected with the grain direction.

B.3.4 Up- and down-milling Douglas fir at different depths of cut

Processing the same species with different depths of cut (Douglas fir processed at 0,5 mm and 1,5 mm) we can observe different values as magnitude but the shape of the curves remains the same (see *Figure B.10*). As known the

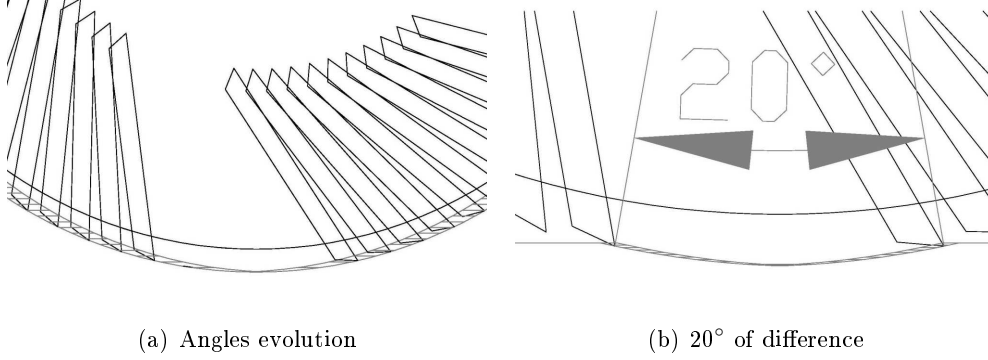


Figure B.8: Changing of the angle between the rake face and the grain direction processing up- and down milling with the same grain direction (a). As can be seen in (b) the difference between the maximal chip thickness processing up- and down-milling is 20°.

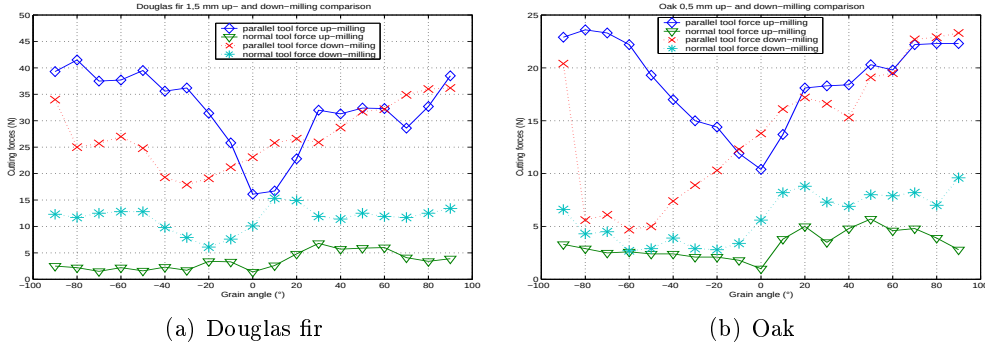


Figure B.9: -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir with 1,5 mm of depth of cut (a) and Oak with 0,5 mm of depth of cut.

resultant of the cutting forces increase with the chip thickness, but as shown the single components increase in a different way. The normal force processing up-milling at 0,5 and 1,5 mm does not increase significantly, while processing down-milling it increases of about 100%. A very significant rise in the values is for the parallel force processing up-milling, proving that with this technique the mechanics are mainly depending on the parallel force, while down-milling both have an important role because of the downward motion pushing the wood on the surface.

B.3.5 Up- and down-milling different species

Up- and down-milling different species (Douglas fir and Oak) with the same depth of cut (0,5 mm) we can observe that the values are not very different. The parallel force processing up- and down-milling is bigger for Oak (with the exception of down milling against the grain because of the formation of tilted grain), while the normal force is bigger for the Douglas fir (probably for the highest friction coefficient). These results depend even on the moisture content,

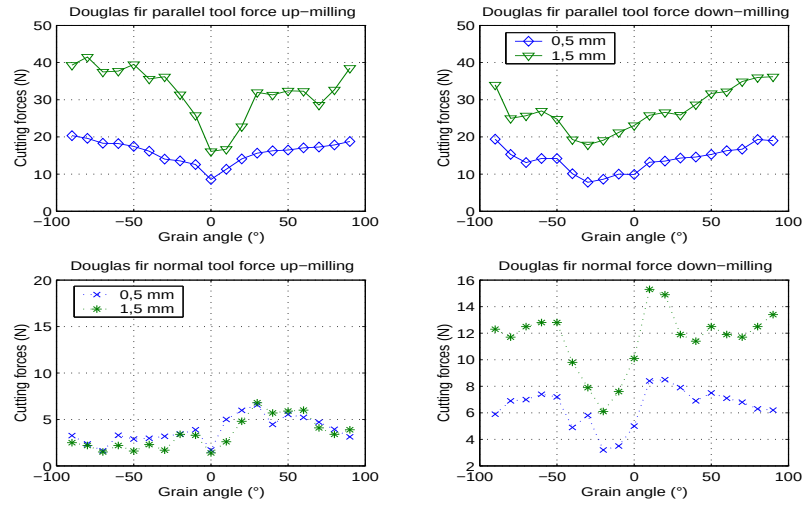


Figura B.10: -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir with 0,5 and 1,5 mm of depth of cut

measured 13,2% for Douglas fir and 12,6% for Oak. Moisture content have an important influence on wood mechanical properties. In this case the higher moisture content in Douglas fir probably involve a higher friction coefficient, while the lower moisture content in Oak involve a higher stiffness that probably makes the cut easier (see *Figure B.11*).

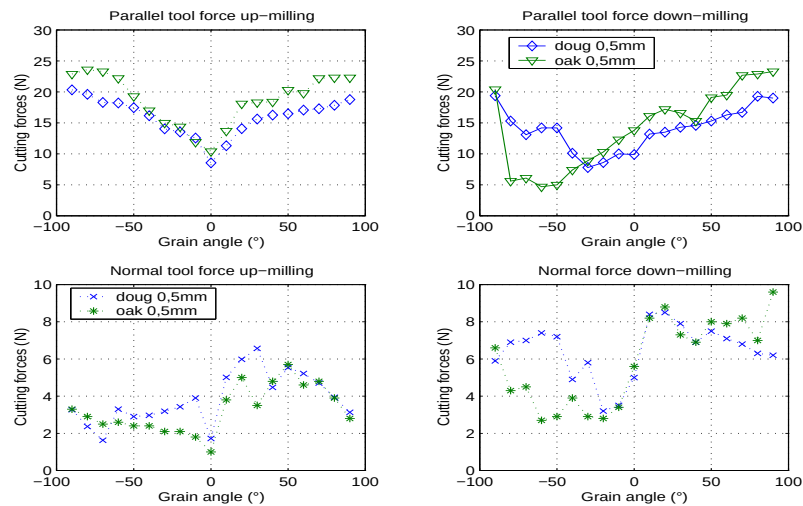


Figura B.11: -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir and Oak with 0,5 mm of depth of cut.

All the data are shown together (plotted for up- and down-milling technique and for principal and normal force) in *Figure B.12*.

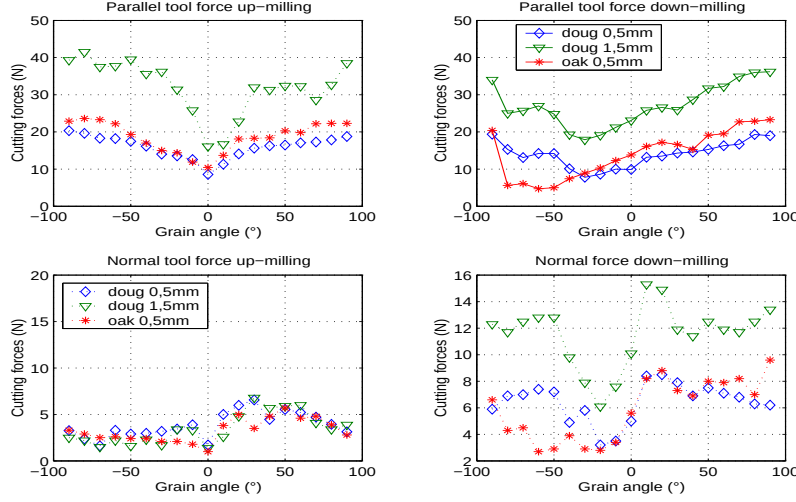


Figura B.12: -90/90 diagram of cutting forces up- and down-milling Douglas fir with 0,5 and 1,5 mm of depth of cut and Oak with 0,5 mm of depth of cut.

B.4 Conclusions

In conclusion a method for analysing cutting forces during a milling process has been developed. This method has been verified processing the same species at different depths of cut and different species with the same depth of cut. Up- and down-milling techniques has been severally analysed and compared together. The two processes have been discussed by a geometrical point of view and this analysis has been connected with cutting forces measurements. Processing up-milling some significant grain angles have been find. This angles correspond to the perpendicularity between the rake face and the grain angle (20°) and to the parallelism between the two (-70°). These are special situations because processing in perpendicularity means that the cut is happening for cross-compression making the cut difficult (this should maximise cutting forces) and in parallelism by transverse tension making the cut easier (this should minimise cutting forces). This behaviour has been confirmed by the cutting forces measurement and analysis. In the normal force, processing up milling at 30° and -70° we can find the minimum and the maximum. The parallel force increase continuously from 0° until 90° and from 0° until -90° . Processing down-milling the diagrams are very similar but shifted of -20° as regards up-milling. A geometrical explanation has been proposed, in facts covering the same arc of a circle in the chip cutting due to the upward and downward motion the angle between the rake face and the grain is not the same. In our case from the impact point down-milling (greatest thickness in the chip and maximum cutting forces) and the getting out point up-milling (greatest thickness in the chip and maximum cutting forces) there is a difference of 22° that explains this behaviour. When down-milling, the normal force is always bigger than up-milling because of the greater chip thickness at the impact and because of the downward motion. In general we can say that down-milling technique requires more force than up-milling technique. Parallel force down-milling against the

grain is usually lower because of the formation of “tilted grain”. Processing Douglas fir at different depths of cut we can observe an increase of the cutting forces. Up-milling this increment is very important for the parallel force, while the normal force doesn’t rise significantly. Down-milling both the forces rise up significantly. Processing Douglas fir and Oak with the same depth of cut we didn’t observe significant differences in the cutting forces values, the parallel force is always bigger processing Oak with the exception of down-milling against the grain because of the more larger presence of tilted grain.

B.5 Bibliography

1. Negri M, Goli G. 2000; Qualità delle superfici lavorate del legno di Abete rosso e di Douglasia valutata con una opportuna classificazione visuale, *Legno Carta e Cellulosa*, VI(1):10-21.
2. Precision Devices, Inc.; Surface Metrology Guide, web address: <http://www.predev.com/smg>.
3. Cyra G., Tanaka C. 2000; The effects of wood-fiber directions on acoustic emission in routine, *Wood Science and Technology* 34 (2000) 237-252.
4. Loehnertz S. P., Vazquez Coz I. 1998; Sawtooth Forces in Cutting Tropical Hardwoods Native to South America, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-567.
5. ASTM D-1666 1987; Standard methods for Conducting Machining Tests of Wood and Wood-Base Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.09 Wood: 257-276.
6. Goli G., Bleron L., Marchal R., Uzielli L., Negri M. 2002; Measurement of cutting forces, in moulding wood at various grain angles. Initial results with Douglas Fir. To be published in the Proceedings of the Conference: Wood science and engineering in the third millennium – Brasov (RO) – November 17-18th 2002.
7. Goli G., Bleron L., Marchal R., Uzielli L., Negri M. 2002; Surfaces formation and quality in moulding wood at various grain angles. Initial results with Douglas fir and Oak, *Proceedings of the IUFRO Symposium: Wood Structure and Properties 2002 – Zvolen(SK) September 1-3rd 2000*.
8. Koch P.; Utilization of the southern pines Vol. II, U.S. Department of Agriculture-Forest Service.
9. McKenzie W. M.; Wood is easy to cut - or is it?, 11th International Wood Machinng Seminar proceedings 27-39.
10. Stewart H. A.; Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool force components, and cutting friction coefficient, *Forest Product Journal* Vol. 19 No. 3 pag. 43-46.

11. Giordano G.; Tecnologia del Legno Vol. II, UTET.

Appendice C

Analisi SEM

Per completare la panoramica sulle superfici fornita in questo lavoro si riporta una sequenza di immagini SEM (Microscopio Elettronico a Scansione) per mostrare il comportamento generale della superficie durante le lavorazioni. Le immagini sono state acquisite per ogni angolo delle fibratura a cui si sono eseguite lavorazioni, lavorando in discordanza e in concordanza e per douglasia e rovere.

Analyse MEB

Pour compléter l'analyses des surfaces de ce travail dans ce chapitre suivre une série d'images MEB (Microscope Electronique à Balayage) pour montrer le comportement générale des surfaces pendant l'usinage. Les images concernes chaque angle du fil, l'usinage en opposition et en avalant sur douglas et chêne.

SEM Analysis

To complete the documentation of this work here follows a sequence of SEM (Scanning Electron Microscope) images to show the general behaviour of the surface when processed. The images have been acquired for every grain angle, up- and down-milling, for douglas fir and oak.

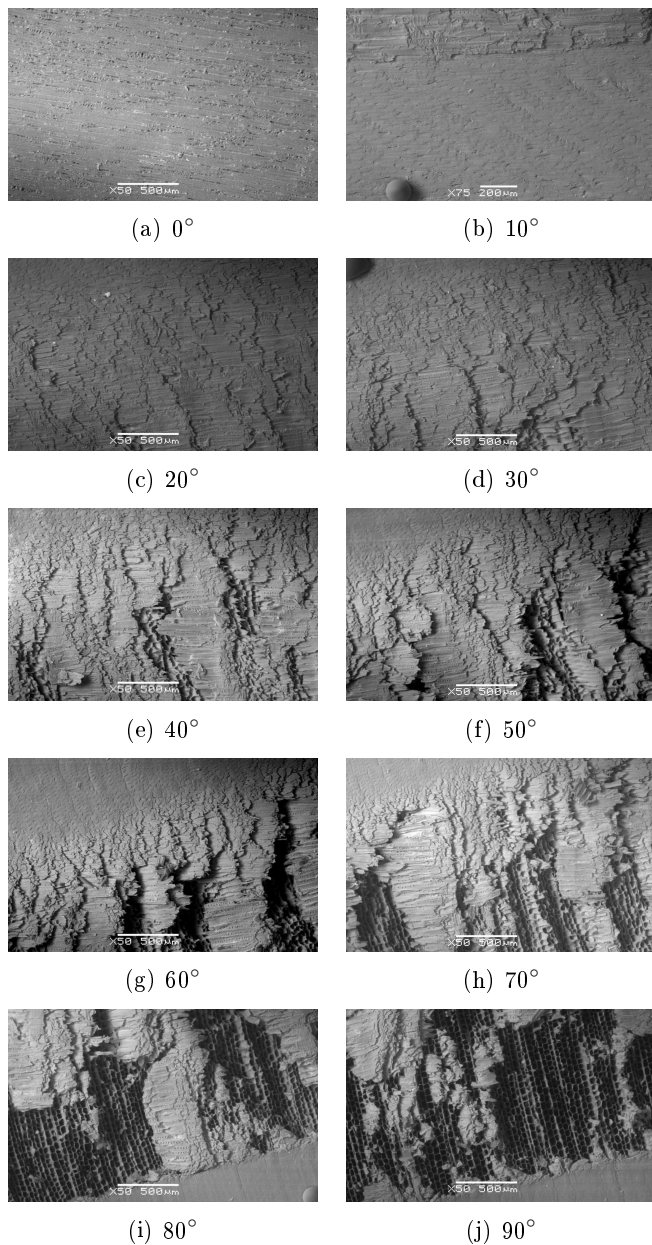


Figura C.1: Immagini SEM di douglasia lavorata nel senso del filo in discordanza — Images MEB de douglas usiné dans le sens du fil en opposition — Douglas fir processed up-milling with the grain. [Foto Goli].

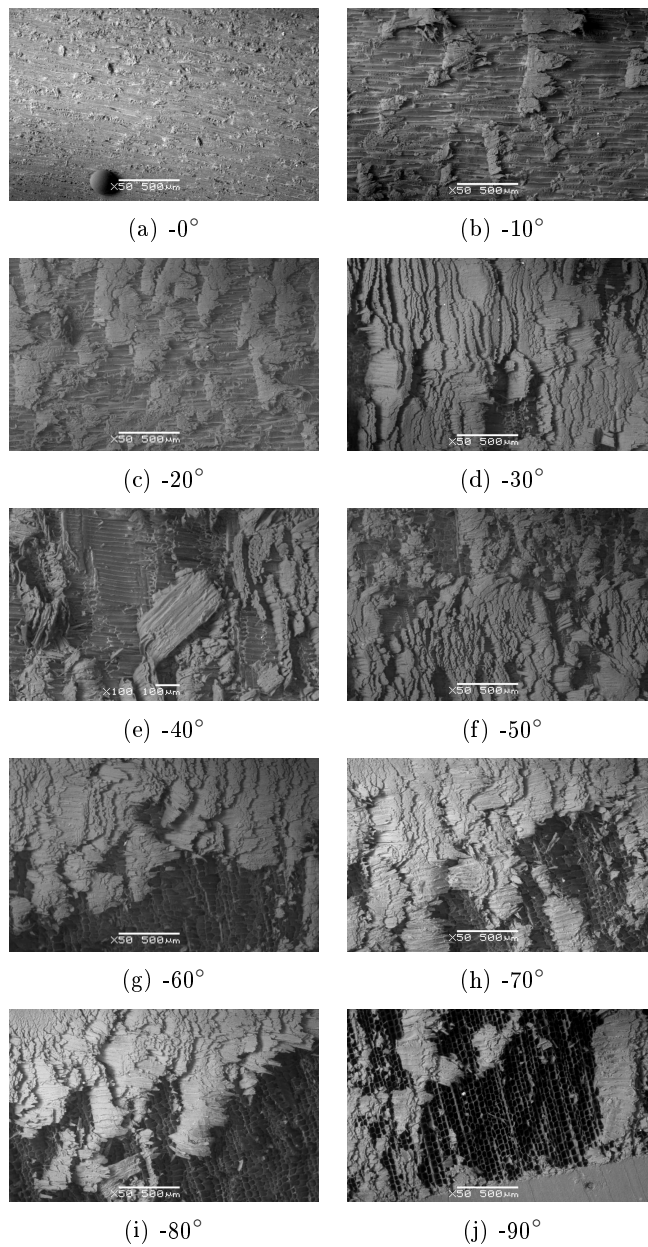


Figura C.2: Immagini SEM di douglasia lavorata nel controfilo in discordanza – Images MEB de douglas usiné contrefil en opposition — Douglas fir processed up-milling against the grain. [Foto Goli].

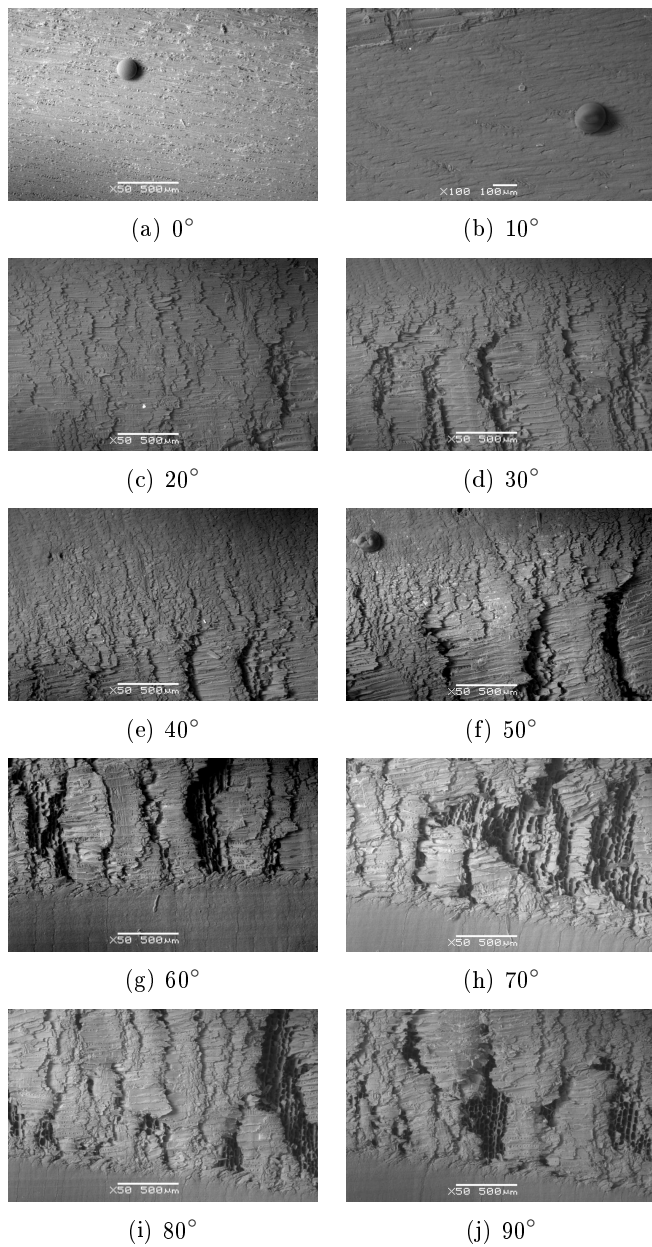


Figura C.3: Immagini SEM di douglasia lavorata nel senso del filo in concordanza – Images MEB de douglas usiné dans le sens du fil en avalant — Douglas fir processed down-milling with the grain. [Foto Goli].

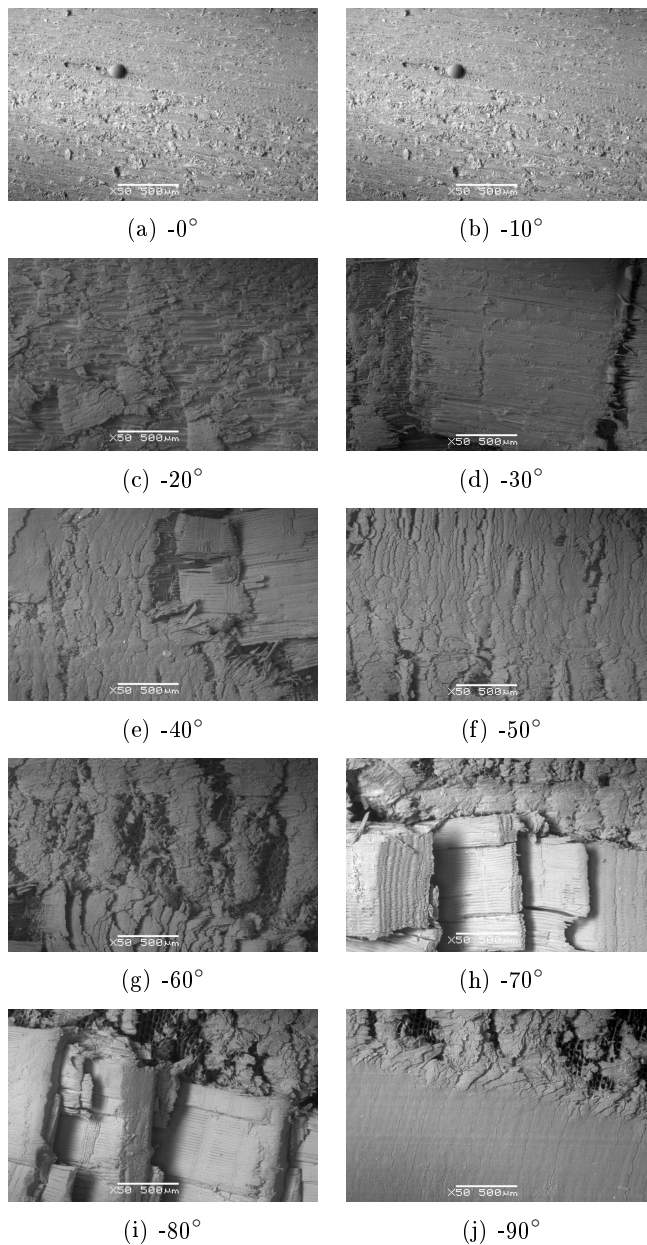


Figura C.4: Immagini SEM di douglasia lavorata contrfilo in concordanza – Images MEB de douglas usiné contrefil en avalant — Douglas fir processed down-milling against the grain. [Foto Goli].

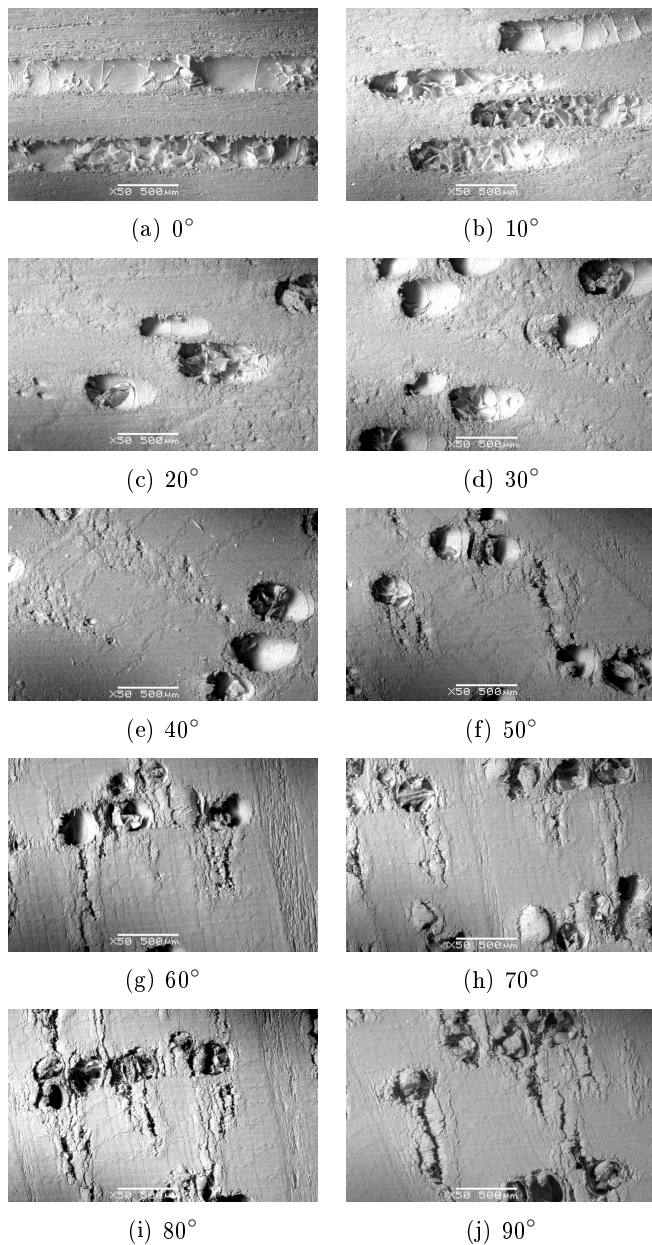


Figura C.5: Immagini SEM di rovere lavorata nel senso del filo in discordanza – Images MEB de chêne usiné dans le sens du fil en opposition — Oak processed up-milling with the grain. [Foto Goli].

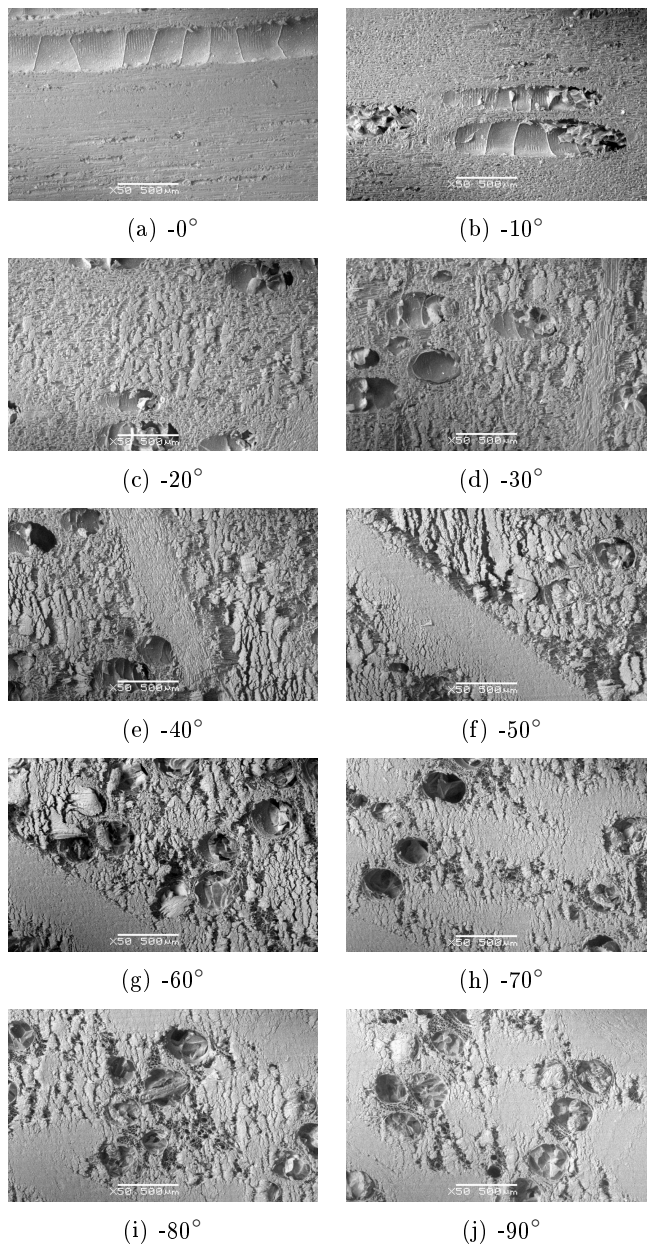


Figura C.6: Immagini SEM di rovere lavorata nel controfilo in discordanza – Images MEB de chêne usiné contrefil en opposition — Oak processed up-milling against the grain. [Foto Goli].

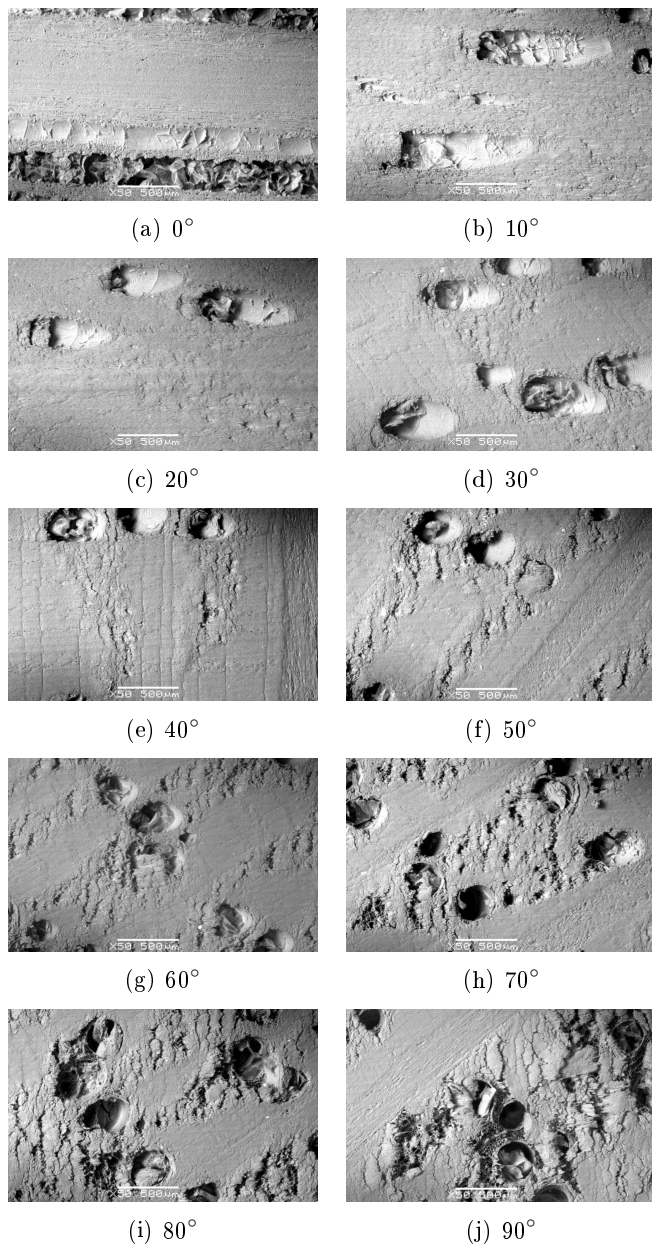


Figura C.7: Immagini SEM di rovere lavorata nel senso del filo in concordanza — Images MEB de chêne usiné dans le sens du fil en avalant — Oak processed down-milling with the grain. [Foto Goli].

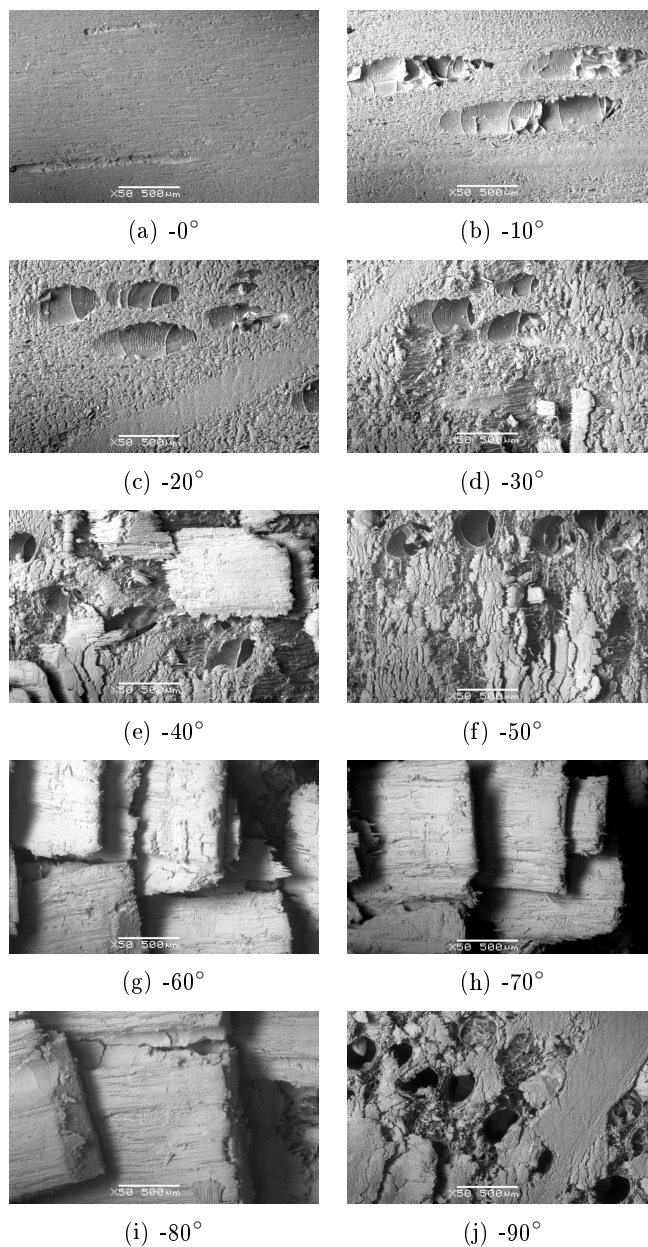


Figura C.8: Immagini SEM di rovere lavorata contrfilo in concordanza – Images MEB de chêne usiné contrefil en avalant — Oak processed down-milling against the grain. [Foto Goli].

Bibliografia

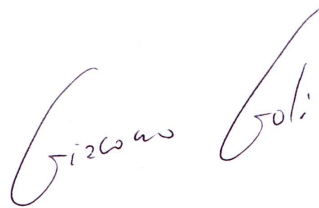
- [1] ASTM D-1666; Standard methods for conducting machining tests of wood and wood-base materials; Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.09, Wood: 257-276, 1987.
- [2] Bonamini G, Collet R., Del Taglia A., Fibbi F., Goli G., Remorini R., Uzielli L.; Equipement and test method for measuring cutting forces and wear of cutting edges in saw teeth for wood, improved with new HVOF coatings; IWMS 14 Proceedings, vol. I pag. 453 - Paris, Epinal, Cluny (France) 12,19 sett. 1999.
- [3] Cyra G., Tanaka C., Muszynski L; Evaluation of surface finishing using non-contact laser sensor displacement device; Wood Structure and Properties '98 Proceedings, pag. 115-1199, Zvolen (Slovakia)
- [4] Cyra G., Tanaka C.; The effect of fiber directions on acoustic emissions in routing; Wood Science and Technology 34 (2000), pag. 237-252.
- [5] Devoto - Oli; Dizionario della lingua italiana.
- [6] Franz N. C; An analysis of the wood cutting process; Ph. D. thesis, Univesity of Michigan Press, Ann Arbor (1958).
- [7] G. Giordano; Tecnologia del legno, UTET.
- [8] Goli G., Negri M., Marchal R., Larricq. P.; The machining process of the european douglas fir: The surface quality; ICFWST'97 Proceedings vol. II pag. 473 - Belgrado (Serbia) 29 set. - 3 ott. 1997.
- [9] Goli. G., Negri M.; Qualificazione del legname trentino - Seconde lavorazioni: qualità delle superfici lavorate del legno di Abete Rosso; Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Tecnologia del Legno.
- [10] Goli G., Larricq P., Marchal R., Negri M., J. P. Costes; Surface quality: comparison among visual grading and 3D roughness measuments; IWMS 15 Proceedings, pag. 459 - Los Angeles (USA) 30/07 - 01/08. 2001.
- [11] Goli G., Marchal R., Negri M.; Industrial machining of Douglas fir with various tools and materials; IWMS 15 Proceedings, pag. 173 - Los Angeles (USA) 30/07 - 01/08. 2001.

- [12] Goli G., Bleron L., Marchal R., Uzielli L., Negri M.; Surfaces Formation and Quality, in Moulding Wood at Various Grain Angles. Initial Results with Douglas Fir and Oak; Wood Structure and Properties 2002 Proceedings, pag - Brezno (Slovakia) 1/9 - 3/9. 2002.
- [13] Goli G., Bleron L., Marchal R., Uzielli L., Negri M.; Measurement of Cutting Forces, in Moulding Wood at Various Grain Angles. Initial Results With Douglas Fir; Wood Science and engineering in the third millennium Proceedings, pag. 123 - Brasov (Romania) 20/11 - 22/11. 2002.
- [14] Goli G. Marchal R., Uzielli L., Negri M.; Measuring cutting forces in routing wood at various grain angles. Study and comparison between up- and down-milling techniques, processing douglas fir and oak; IWMS 16 Proceedings, pag. 127 - Matsue (Japan) 24/08 - 30/08. 2003.
- [15] Goli G., Marchal. R., Uzielli L.; Generalità su irregolarità e difetti; in pubblicazione sulla rivista Xylon.
- [16] Goli G., Marchal. R., Uzielli L.; Classificazione qualitativa dei difetti con metodo visuale; in pubblicazione sulla rivista Xylon.
- [17] Juan J.; Comment bien usiner le bois, CTBA (1992).
- [18] Kronenberg M.; Machining Science and Application; Pergamon Press (1966).
- [19] Kivimaa H.; Die Schnittkraft in der Holzbearbeitung. Holz als Roh-und Werkstoff 10 (1952) pag. 94-108.
- [20] Kivimaa H.; Cutting Force in Wood-working, The state institute for technical research, Finland; Helsinki 1950.
- [21] Koch P.; Utilization of southern pines; Vol. I Agric. Handb. 420 Washington, DC: U.S. Department of Agriculture (1972).
- [22] McKenzie W. M., Franz N. C.; Basic aspects of inclined or oblique wood cutting. Forest product Journal 14(12)(1964) pag. 555-566
- [23] McKenzie W. M.; Fundamental aspects of the wood cutting process, Forest Products Journal 9 (1969) pag. 447-456
- [24] Negri M., Goli G.; Qualità delle superfici lavorate del legno di Abete rosso e di Douglasia valutata con una opportuna classificazione visuale; Legno Cellulosa e Carta, VI, n° 1, pag. 10-21.
- [25] Petrocchi S.; Prove di lavorabilità e di abrasione degli utensili su alcune specie legnose; Tesi di laurea in Scienze Forestali, Università di Firenze, Facoltà di Agraria, anno accademico 1983-84.
- [26] Piao Y. S., Fukuri H.; Specific cutting force in the machining of wood, Mokuzai Gakkaishi 10 (1984) pag. 827-832

- [27] Stewart H. A.; Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool components, and cutting friction coefficient, Forest Product Journal 3 (1969), pag. 43-46
- [28] Thomas G. G.; Production Technology; Oxford University Press (1970)

RINGRAZIAMENTI

Ancora una volta come fare a non ringraziare i direttori di tesi, anche se lo fanno di lavoro: il Prof. Uzielli e il Prof. Rémy Marchal, che oramai da qualche anno mi seguono in questa avventura e nel tempo lo hanno fatto per numerose altre, spero, con soddisfazione di tutti. Li ringrazio per la disponibilità, per la celerità quando necessario, per l'aiuto nel ricercare i mezzi più opportuni e per le disponibilità finanziarie, che mi hanno permesso di partecipare a numerosi convegni anche in terre lontane da cui sono tornato sicuramente arricchito. Li vorrei ringraziare anche per avermi permesso di lavorare in indipendenza, cosa che non tutti apprezzano, ma che io amo molto. Un bacio a Denis Lagadrière per le spiegazioni, l'assistenza e il permesso di utilizzare il MEB anche da solo. La Laura l'ho già ringraziata e quindi evito di farlo anche se lo faccio; la mamma, che ha sottoscritto l'assicurazione del capo famiglia e che grazie alla quale verranno pagati 100 euro ad uno svizzero a cui abbiamo tagliato la corda smuovendo un masso sul dente del gigante; il mi' fratello, perché gli voglio bene; i miei nonni perché mi hanno permesso di spostarmi con la macchina tra l'Italia e la Francia; la zia topa perché ci è sempre vicina; la zia Luana per avermi perdonato i numerosi pacchi che le ho dato a pranzo; il prof. Togni per il sostegno morale, il prof Del Taglia per la squisitezza dimostrata sempre, Lorenzo Busoni per gli aiuti ed i suggerimenti da vero fisico, Pidivi per essere il promotore della rivoluzione software; i colleghi tutti del dipartimento, tutti gli amici, ai quali non sono riuscito a stare vicino in questi difficili periodi di continui spostamenti e che, spero, non me ne vogliano; ai meccanizzatori per la macchina fotografica digitale, così agli assestatori, ai metallari di Cluny per il prestito di preziosi materiali, al Prof. Tanì per la rilettura, e così a Bernard Thibaut per i suggerimenti e la rilettura, un grazie a chi si è fatto bastonare a Genova, al Buso per l'ospitalità a Parigi e gli aiuti ogni tanto forniti, a Geneviève e Marie, tanto gentili, ai miei amichetti arabi per la compagnia, e così a Mariana, al kebabbista, a David, a Louis compagno amabile di numerose serate passate in mezzo alle mucche. Infine un pensiero a Darmawan, che forse non riceverà mai, ma che è stato nei nostri cuori per tutto quello che gli è successo. Alla neve vino e zucchero, che ha aggradato numerose serate passate nella mia casetta spersa tra le campagne erbose, a Philippe che mi ha portato in montagna, altrimenti in Francia sarei impazzito, ai corridori clunyacensi e a quelli fiorentini, alle marmellate naturali, alla lana, alla frutta buona, che talvolta ci aiutano a levarci questo velo di plastica da sopra la faccia, ai colleghi che mi hanno costretto a trascinarci dietro in Giappone per 15 giorni il loro poster da 10 chili, alle associazioni dei negozianti, perché come loro dicono i prezzi al consumo non sono variati nell'ultimo anno, al doppiogiochismo squallido dei fiorentini sempre pronti a lamentarsi del carovita e capaci di far pagare 300 euro una stanza singola, al cavaliere di Arcore, sperando che cada da cavallo, ai telegiornali che dicono sempre tante cose interessanti, a Gasparri per l'omonima legge, ad Alberto Sordi, all'amministrazione comunale del Comune di Firenze perché adesso finalmente abbiamo dei parcheggi grazie all'introduzione dei bolli rossi, a coloro che hanno pitturato la croce di monte Morello, alla schiacciata bona e al gelato bono, così facili da fare ma che sempre più spesso, per taccagneria e noncuranza riescono a far diventare cattivi, a questa città di commercianti beceri, a Carlino per le scorribande in Procinto, a Fa-fa per la candela e l'aperitivo più lungo della mia vita, a tutti coloro che pensano che i piaceri debbano essere pagati cari e su questo assioma si arricchiscono, a tutti coloro che si divertono con poco alla faccia dei precedenti, a tutti coloro che portano avanti investendo il proprio tempo libero nella battaglia del software libero (forse si chiama così per questo) e ci permettono con i loro sforzi di fruirne gratuitamente, ma anche a coloro che nelle cose fanno un giusto guadagno.





Giacomo Goli è nato a Firenze il 22/12/1973. Dopo aver brillato alle scuole elementari e medie passa 5 anni in un istituto superiore di ragioneria, periodo sufficiente a fargli capire di aver sbagliato strada. Si diploma nel 1992 con 38/60. Si iscrive poi alla Facoltà di Scienze Forestali dell'Università degli Studi di Firenze e completa gli studi nel 1999 con il voto di 110/110 con una tesi in Tecnologia del Legno, il cui relatore fu il Prof. Uzielli. Durante gli studi viene in contatto con l'ENSAM Cluny e Rémy Marchal. Nel 2000 a seguito di concorso vince un posto per il dottorato in "Economia Pianificazione Forestale e Scienze del Legno" dell'Università degli Studi di Firenze, che ben presto si trasforma in una co-tutela internazionale con l'ENSAM Cluny. È il felice co-possessore del sito <http://www.caffeina.org>. Per chi ne avesse interesse il suo indirizzo di posta elettronica è "giacomo.goli@poste.it".



*Finita di stampare 3 dicembre 2003, interamente composta con $\text{\LaTeX}$ 2 ϵ .
Le immagini sono tutte acquisite ed elaborate con l'uso di GIMP
Elaboratore di testo TeXnicCenter*