POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

GLI EFFETTI DELLA MACINAZIONE SUI MINERALI FIBROSI: IL CASO DELLA TREMOLITE

Relatori:		
Prof. Dott.ssa Paola Marini		

Dott.ssa Giovanna Zanetti

Ing. Oliviero Baietto

Correlatore:

Candidata:

Mariangela Diano

INDICE

I	NTROD	UZIONE	1
1	AMIA	NTO IN NATURA	4
	1.1 PR	OPRIETÀ TECNICHE ED USI DELL'AMIANTO	7
	1.2 RII	FERIMENTI STORICI ED EPIDEMIOLOGICI	11
	1.2	.1 Storia	11
	1.2	.2 Epidemiologia (Conoscenze scientifiche e Patologie)	12
	1.2	.3 Situazione epidemiologica Italiana	16
	1.3 RI	FERIMENTI NORMATIVI	19
	1.3	.1 Normativa europea	21
	1.3	.2 Normativa italiana	23
	1.3	.3 Limiti di legge	31
2	LA TR	EMOLITE IN NATURA: PRISMATICA E FIBROSA	34
	2.1 RE	VISIONE DELLA LETTERATURA DISPONIBILE SULLA TREMOLITE	38
3	MATE	RIALI, ATTREZZATURE E METODOLOGIA D'ANALISI	45
	3.1 MA	ATERIALI	45
	3.1	.1 Inquadramento geologico dei campioni	48
	3.2 PR	OCEDURE DI SICUREZZA	53
	3.3 AT	TREZZATURE	54
	3.3	.1 Attrezzature protettive	54
	3.3	.2 Attrezzature per la preparazione del campione	56
	3.3	.3 Apparecchiatura per la comminuzione	62
	3.3	.4 Strumentazione per l'analisi	64
	3.3	.5 Software d'analisi	75
	3.4 MI	TODOLOGIA DI ANALISI	81

4	RIS	SULTATI	86
	4.1	BRACCHIELLO	89
		4.1.1 Iniziale	89
		4.1.2 Macinato	92
	4.2	VERRAYES	95
		4.2.1 Iniziale	95
		4.2.2 Macinato	98
	4.3	CAPRIE	101
		4.3.1 Iniziale	101
		4.3.1 Macinato	104
	4.4	Monastero	107
		4.4.1 Iniziale	107
		4.4.2 Macinato	111
5	DIS	SCUSSIONE DEI RISULTATI	115
	5.1	ANALISI MORFOLOGICA	115
	5.2	ANALISI GRANULOMETRICA	117
	5.3	ANALISI DIMENSIONALE SECONDO DEFINIZIONE DELL'HEALT	H AND
		SAFETY EXECUTIVE (2005)	119
C	ONO	CLUSIONI	121
B	[BL]	LIOGRAFIA	127
F	ONT	TI NORMATIVE	136
SI	ТО	GRAFIA	139
A	PPE	ENDICE	140
	AL	LEGATO I	141
	AL	LEGATO II	143
R	ING	GRAZIAMENTI	147

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 - I minerali dell'amianto.	
Figura 1.2 - Accertamenti per la bonifica di materiali contenenti amianto (MCA).	. 8
Figura 1.3 - Azioni da intraprendere alla successiva valutazione dello stato dei materiali	
contenenti amianto (in riferimento al: D.M. 6/09/1994).	. 9
Figura 1.4 - Principali impieghi dell'amianto nel settore industriale, edilizio, domestico e dei	
trasporti. Informazioni tratte da: (Benvenuti & Di Fabbio, s.d.)	10
Figura 1.5 - Anatomia del sistema respiratorio, tratta da: (Borin, et al., 2011)	13
Figura 1.6 - Malattie correlate all'esposizione ad amianto, tratto da: (Arpa Veneto, 2013)	14
Figura 1.7 - Istogramma sulla produzione nazionale e importazione di amianto tra gli anni	
1946 e 1992, tratto da: (Ministero della Salute, 2012)	17
Figura 1.8 - Consumo di amianto pro capite (1951-1992) e decessi per mesotelioma osservati	
(1970-1999) e previsti (2000-2030) in Italia, tratto da: (Borin, et al., 2011)	18
Figura 1.9 - Mappa mondiale dei paesi con divieto di uso e produzione di amianto, tratta da:	
(Asbestos Nation, s.d.).	20
Figura 2.1 - Struttura della tremolite con osservazione perpendicolare all'asse z; sono	
mostrati: in giallo i tetraedri (SiO ₄) con al vertice gli ossigeni (sfere grigie),	
sfere rosse a rappresentare Mg, quelle blu Ca e quelle azzurre (grandi) OH.	
Tratta da: (Compagnoni, et al., 1983).	34
Figura 2.2 - Esempio di terminologia nella distinzione degli abiti cristallini degli anfiboli,	
tratto da: (Campbell, et al., 1979).	35
Figura 2.3 - Piani di debolezza strutturale: (a) tipica forma di cristallo prismatico di anfibolo;	
si evidenziano le sfaccettature e i piani di clivaggio, tratto da: (Addison &	
McConnell, 2008) (b) diagramma di struttura e di taglio dei cristalli di anfibolo;	
rottura preferenziale lungo i piani (110) e (110) e parallelamente all'asse c a	
produrre cristalli aciculari, tratto da: (Zoltai, 1979)	37
Figura 2.4 - L'influenza della dimensione della fibra sul macrofago, tratta da: (Petrus, 2012)	

Figura 2.5 - Fagocitosi frustrata e danneggiamento della membrana del macrofago, tratta da:	
(Fubini, s.d.).	. 39
Figura 3.1 - Campione Bracchiello.	. 46
Figura 3.2 - Campione Caprie.	. 46
Figura 3.3 - Campione Verrayes; (a) componenti prismatiche e (b) componenti fini disperse o	
aggregate.	. 47
Figura 3.4 - Campione Monastero: (a) componenti flessibili e (b) fascio con estremità aperte	. 47
Figura 3.5 - Olio ad indice di rifrazione noto della Cargille Laboratories Inc.	. 48
Figura 3.6 - Identificativo geologico di Bracchiello e Monastero di Lanzo al Foglio n.55	
"Susa" tratto da (I.G.M, 1959).	. 50
Figura 3.7 - Identificativo geologico di Caprie al Foglio n.55 "Susa" tratto da (I.G.M, 1959)	. 50
Figura 3.8 - Identificativo geologico di Verrayes al Foglio n.22 "Aosta" tratto da (I.G.M, 1959).	. 51
Figura 3.9 - Porzione di legenda (caratteristica per Figura 3.6, Figura 3.7 e Figura 3.8): tratto da (I.G.M, 1959).	. 52
Figura 3.10 - Cappa aspirante del Laboratorio Amianto provvista di: (a) bilancia di precisione; (b) fogli di carta - piano di appoggio per vetrini; (c) carta assorbente; (d) bottiglia a spruzzetta contenente acqua; (e) cestino con sacchetto impermeabile per la raccolta dei piccoli rifiuti contenenti amianto; (f)	
macroscopio. Tratta da: (Marini, 2015).	. 55
Figura 3.11 - Contenitore dei campioni di tremolite	. 55
Figura 3.12 - Bilancia di precisione SALTER AND.	. 56
Figura 3.13 - Disposizione dei vetrini a seguito della fase preliminare di pulizia: in alto la scatolina contenente i vetrini coprioggetto e in basso i vetrini portaoggetto	58
Figura 3.14 - Inconvenienti nella posa del coprioggetto associati alla deposizione delle gocce di olio: (a) Aggiunta e (b) rimozione del liquido, tratto da: (<amici del<="" td=""><td></td></amici>	
Microscopio>)	. 59
Figura 3.15 - Preparati microscopici con identificazione dei campioni	. 59
Figura 3.16 - Particolare di stub usato per analisi SEM	. 61
Figura 3.17 - Schema dell'attrezzatura per la filtrazione dei campioni su membrana	. 61
Figura 3.18 - Montaggio del filtro sullo stub: (a) contenitore per stub e (b) stub realizzati con	
adesione del campione su superficie biadesiva in carbonio	. 61
Figura 3.19 - Giara e corpo macinante in agata.	. 62
Figura 3.20 - Vista interna della giara in agata con coperchio	. 63
Figura 3.21 - Molino a masse eccentriche modello 954/2 della Humboldt-Wedag	. 63
Figura 3.22 - Fotomacroscopio Wild Leica M420 della Wild Heerbrugg.	. 64

Figura 3.23 - Microscopio ottico a contrasto di fase (LEICA DM LP), indicazione delle parti	
costituenti. Tratto da (Marini, 2015)	65
Figura 3.24 - Obiettivo per contrasto di fase, tratto da: (Romano, 2016).	66
Figura 3.25 - Tabella degli effetti cromatici, tratto da: (Shmidt, 1985)	69
Figura 3.26 - Microscopio elettronico a scansione MIRA3 LMH (TESCAN)	71
Figura 3.27 - Schema di elettronico a scansione (SEM), tratto da: (Bacaloni, 2013)	72
Figura 3.28 - SEM: interazione tra fascio di elettroni e il campione; in rosso il segnale dei	
fotoni e in verde il segnale degli elettroni.	74
Figura 3.29 - Telecamera DeltaPix istallata sul microscopio.	76
Figura 3.30 - Uso del software DeltaPix Insight: a sinistra 'Caprie iniziale' a destra	
'Monastero iniziale'	77
Figura 3.31 - Schermata del software Deltapix Insight: uso del comando 'Riga' per la	
misurazione.	77
Figura 3.32 - Uso del software ImageJ: a sinistra 'Caprie iniziale' a destra 'Monastero	
iniziale'	78
Figura 3.33 - Finestra di ImageJ all'apertura del programma, si evidenzia il comando Straight	
Line Selection.	79
Figura 3.34 - Finestra dei risultati di ImageJ.	80
Figura 3.35 - Porzione ingrandita di un campo di osservazione del campione 'Monastero'	
iniziale: misurazione delle fibre e conteggio numerico.	80
Figura 3.36 - Metodologia operativa condotta su campione: macinazione ed osservazione del	
preparato	81
Figura 3.37 - Conteggio delle fibre che si collocano dentro o fuori il reticolo.	83
Figura 3.38 - Software di conteggio e misurazione delle fibre in funzione della distribuzione	
nel campo d'osservazione.	84
Figura 3.39 - Esempio di distinzione tra componenti: (a) fibrose, (b) aciculari, (c) prismatiche	
o (d) in fascio di fibre (Campione: Caprie iniziale a sinistra, Monastero iniziale	
a destra; 10x MOCF)	85
Figura 4.1 - Bracchiello iniziale: immagini a MOCF (10x).	89
Figura 4.2 - Bracchiello iniziale: immagini al SEM (5000 – 2000 – 1000 ingrandimenti)	90
Figura 4.3 - Bracchiello iniziale: istogramma di frequenza percentuale delle fibre in ciascuna	
classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE);	
Analisi dimensionale.	91
Figura 4.4 - Bracchiello iniziale: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da	
osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica	91
Figura 4.5 - Bracchiello macinato: immagini a MOCF (40x).	92
Figura 4.6 - Bracchiello macinato: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti)	93

Figura 4.7 - Bracchiello macinato: istogramma di frequenza percentuale delle fibre in	
ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche	
(HSE); Analisi dimensionale	93
Figura 4.8 - Bracchiello macinato: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da	
osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica	94
Figura 4.9 - Verrayes iniziale: immagini a MOCF (10x).	95
Figura 4.10 - Verrayes iniziale: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).	96
Figura 4.11 - Verrayes iniziale: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di	
lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi	
dimensionale.	96
Figura 4.12 - Verrayes iniziale: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da	
osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.	97
Figura 4.13 - Verrayes macinato immagini a MOCF (40x).	98
Figura 4.14 - Verrayes macinato: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).	99
Figura 4.15 - Verrayes macinato: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di	
lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi	
dimensionale.	99
Figura 4.16 - Verrayes macinato: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da	
osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.	100
Figura 4.17 - Caprie iniziale immagini a MOCF (10x)	101
Figura 4.18 - Caprie iniziale: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti)	102
Figura 4.19 - Caprie iniziale: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di	
lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi	
dimensionale.	102
Figura 4.20 - Caprie iniziale: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione	
diretta a MOCF; Analisi morfologica.	103
Figura 4.21 - Caprie macinato immagini a MOCF (40x)	104
Figura 4.22 - Caprie macinato: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti)	105
Figura 4.23 - Caprie macinato: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di	
lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi	
dimensionale.	105
Figura 4.24 - Caprie macinato: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da	
osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica	106
Figura 4.25 - Monastero iniziale immagini a MOCF (10x).	108
Figura 4.26 - Monastero iniziale: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).	109

Figura 4.27	- Monastero iniziale: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di	
	lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi	
	dimensionale.	110
Figura 4.28	- Monastero iniziale: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da	
	osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica	110
Figura 4.29 -	- Monastero macinato immagini a MOCF (40x).	111
Figura 4.30 -	- Monastero macinato immagini a MOCF (20x).	112
Figura 4.31 -	- Monastero macinato immagini a MOCF (40x).	112
Figura 4.32 -	- Monastero macinato: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti)	113
Figura 4.33	- Monastero macinato: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di	
	lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi	
	dimensionale.	114
Figura 4.34	- Monastero macinato: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da	
	osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica	114
Figura 5.1	Andamento della fibrosità e prismaticità delle fibre, prima e dopo la macinazione,	
	in riferimento all'analisi morfologica soggettiva.	116
Figura 5.2 -	Andamento granulometrico delle fibre di ciascun campione, prima e dopo la	
	macinazione.	118
Figura 5.3	Andamento della fibrosità e prismaticità delle fibre, prima e dopo la macinazione,	
	in riferimento all'Health and Safety Executive (2005).	120

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 - Principali litotipi della Zona Piemontese potenzialmente contenenti amianto	
(Compagnoni & Groppo, 2006).	6
Tabella 1.2 - Luoghi in cui è possibile riscontrare amianto in funzione delle proprietà	
(Benvenuti & Di Fabbio, s.d.).	10
Tabella 1.3 - Paesi con divieto di produzione ed utilizzo di amianto (Kazan-Allen, 2018)	19
Tabella 1.4 - Limiti previsti nella Legislazione Italiana sull'amianto (Borin, et al., 2011)	32
Tabella 2.1 - Proprietà della tremolite.	34
Tabella 2.2 - Numero di particelle (μg) di tremolite usati da (Wagner, et al., 1982)	42
Tabella 2.3 - Studi in vivo.	43
Tabella 3.1 - Campioni di tremolite e provenienza.	45
Tabella 3.2 - Parametri ottici dei minerali di amianto definibili con l'utilizzo di microscopia	
ottica polarizzata (Deer, et al., 1992).	70
Tabella 3.3 - Peso del campione depositato su vetrino per visione a MOCF	81
Tabella 3.4 - Campi di osservazione e fibre conteggiate per ciascun campione	83
Tabella 4.1 - Informazioni sulla preparazione dei campioni, campi osservati e fibre analizzate	
a MOCF per ciascun campione iniziale.	88
Tabella 4.2 - Informazioni sulla preparazione dei campioni, campi osservati e fibre analizzate	
a MOCF per ciascun campione macinato.	88

INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente lavoro di tesi consiste nello studio degli effetti della macinazione sull'abito cristallino della tremolite. Lo studio si è incentrato su questa tipologia di minerale anfibolico per le varietà di abiti che si possono sviluppare durante il processo di crescita e formazione del cristallo; è frequente riscontrare l'abito *prismatico* (non asbestiforme), ma in natura è diffuso anche l'abito fibroso o asbestiforme.

L'interesse verso questo minerale nasce da un'accurata indagine bibliografica sulla tremolite, principalmente incentrata sullo studio degli effetti di un'eventuale comminuzione del cristallo. Tale analisi risulta utile per valutare, quindi, gli effetti dell'esposizione all'amianto di tutti i lavoratori impegnati in azioni di scavo o movimentazione delle pietre verdi, sul territorio d'indagine del Piemonte e della Valle d'Aosta.

La pericolosità che scaturisce dall'esposizione all'amianto è la ragione per cui negli anni si è focalizzata l'attenzione su studi epidemiologici, diretti a comprendere il differente potenziale cancerogeno della tremolite in funzione dell'abito cristallino; tale potenziale da letteratura risulta minore quando l'abito del minerale è prismatico (non asbestiforme), rispetto a quello fibroso (Davis, et al., 1985; Davis, et al., 1991; Wagner, et al., 1960; Smith, et al., 1979; Stanton, et al., 1981).

L'attività si inserisce in un vasto programma di ricerca del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino, coordinato dalla Prof.ssa Paola Marini. Lo studio è finalizzato a comprendere le proprietà ed il comportamento del minerale sottoposto a comminuzione e, quindi, a riscontrare se il minerale produce fibre o prismi.

L'indagine è stata condotta su quattro campioni di tremolite provenienti dai siti di: Bracchiello, Monastero di Lanzo e Caprie, localizzati nella Regione Piemonte; Verrayes nella Regione Autonoma della Valle d'Aosta.

L'analisi si suddivide principalmente in due fasi: una prima fase di osservazione morfologica del campione con la tecnica della microscopia ottica a contrasto di fase (MOCF) e della microscopia elettronica a scansione (SEM); una seconda fase di conteggio e valutazione della granulometria delle "particelle" su immagini acquisite (o dirette) da MOCF. Quest'ultimo *step* anticipa quindi la necessità di operare con software idonei (Leica Application Suite (LAS), DeltaPix Insight ed ImageJ) per garantire sia un'ottimale acquisizione delle immagini che l'opportunità di condurre misurazioni di lunghezza e diametro dirette sulle fibre. È necessario precisare che l'indagine si realizza sia sul campione tal quale che sul campione sottoposto al processo di comminuzione con molino a masse eccentriche.

La definizione di "fibra respirabile", dettata dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 1986) e ripresa dal D.M. 6/09/94, è basata sui seguenti parametri dimensionali:

- lunghezza maggiore di 5 μm;
- diametro minore di 3 μm;
- rapporto lunghezza/diametro maggiore di 3:1.

L'indagine morfo-dimensionale condotta sulle fibre e/o su "frammenti", vantanti un abito prismatico, si realizza attraverso l'acquisizione delle lunghezze delle sole "particelle" aventi un'estensione maggiore di 5 µm e senza alcuna restrizione nel diametro.

Inoltre, per la sola indagine dimensionale, è stata introdotta la definizione di *fibra* asbestiforme derivante dall'Health and Safety Executive (2005). Questa ha persmesso di condurre una distizione tra fibre asbestiformi e non asbestiformi, poiché strettamente basata sulla dimensione, più precisamente sul rapporto lunghezza/diametro, e su altri aspetti morfologici della fibra. L'HSE considera *fibra asbestiforme* la fibra generalmente riconosciuta attraverso l'utilizzo del microscopio ottico per le seguenti caratteristiche:

- Rapporto lunghezza/spessore variabile in un range da 20:1 a 100:1 o superiore per fibre più lunghe di 5 μm;
- Capacità di dividersi in fibrille molto sottili;

- Per due o più elementi tra i seguenti:
 - Fibre parallele riscontrate in fasci;
 - Fasci di fibre con estremità sfilacciate;
 - Fibre aciculari, ovvero a forma di sottili aghi;
 - Masse confuse di singole fibre;
 - Fibre che mostrano curvatura.

Il presente elaborato si compone di tre parti. La prima, di carattere prettamente conoscitivo, in cui vengono illustrate le generalità dell'amianto ed i cambiamenti avvenuti a livello internazionale nella produzione e/o nei consumi. La seconda, in cui vengono presentate le principali caratteristiche della tremolite e i fattori che influenzano la pericolosità del minerale, in funzione dell'abito cristallino. Questa sezione include la revisione della letteratura sugli studi epidemiologici condotti sulla tremolite fibrosa (asbestiforme) e prismatica (non asbestiforme), incentrati principalmente sulla distinzione della differente cancerogenicità per l'uomo. Nella terza parte vengono illustrati i materiali, le procedure di sicurezza interne al Laboratorio Analisi Amianto del DIATI, la strumentazione ed, infine, la descrizione delle metodologie operative con successiva interpretazione dei dati acquisiti dal processo di misurazione e riconoscimento morfologico delle "fibre".

1 AMIANTO IN NATURA

Col termine amianto (o asbesto) si indica quel gruppo di minerali naturali, appartenenti alla classe mineralogica dei silicati (più specificatamente inosilicati e fillosilicati), caratterizzati da un aspetto fibroso e distinguibili nelle serie mineralogiche del serpentino (crisotilo) e degli anfiboli (crocidolite, amosite, tremolite, antofillite e actinolite) (**Figura 1.1**).

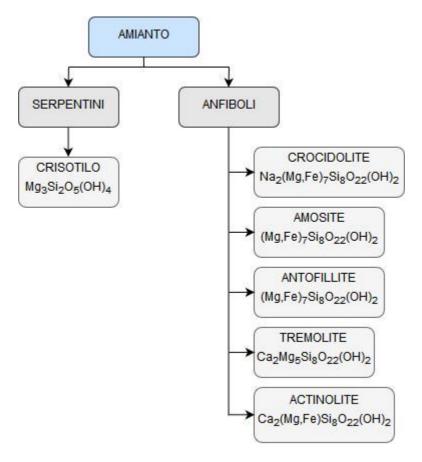


Figura 1.1 - I minerali dell'amianto.

Malinconico et al. (2011), con il termine "Amianto Naturale" ne considera "il minerale d'amianto così come affiora, o sub-affiora, nelle rocce e nei loro prodotti d'alterazione nell'ambiente naturale, con contenuto di minerali d'amianto variabile e non prevedibile quantitativamente".

L'amianto allo stato naturale è presente in grandi quantità in molte parti del globo terrestre e viene estratto, come materia prima, da cave o miniere (a cielo aperto o, in alcuni

casi, anche in sotterraneo). Nel mondo sono presenti numerosi giacimenti produttivi o dismessi, osservabili in **Allegato 1** e localizzati principalmente in Canada, Russia, Sud Africa, Cina, Brasile e anche in Italia.

In Italia se ne riscontra la presenza in alcune regioni come: Emilia-Romagna (cave di ofioliti), Lombardia, Piemonte (ex-cava di Balangero) e in Sicilia (Malinconico, et al., 2011).

La situazione Piemontese viene descritta con maggior dettaglio dall'Arpa Piemonte (2008), documento in sui si osserva che l'amianto si presenta in associazione a rocce molto diffuse quali le ofioliti¹, note anche con il termine "Pietre Verdi", ed in particolare alle serpentiniti. Tali mineralizzazioni d'amianto "sono concentrate principalmente nelle Valli di Lanzo (Massiccio Ultrabasico di Lanzo), nelle Valli di Susa e Chisone, nelle Valli Varaita, Maira e Po (Massiccio del Monviso) e vasti affioramenti si ritrovano in provincia di Alessandria (Gruppo di Voltri)".

Le principali varietà d'amianto riscontrabili sul territorio piemontese sono il crisotilo, la tremolite e l'actinolite. Compagnoni & Groppo (2006), nella localizzazione delle concentrazioni amiantifere e di altri minerali fibrosi, mostrarono che "mentre il crisotilo è presente solo nelle rocce ultrafemiche serpentinizzate, la tremolite e l'actinolite possono formarsi in uno spettro più ampio di litotipi, appartenenti alla Zona Piemontese dei Calcescisti con metaofioliti, tra cui scisti actinolitici, cloritoscisti, talcoscisti, prasiniti e rocce oficarbonatiche" (**Tabella 1.1**).

Tuttavia, all'interno dei differenti litotipi (principalmente nelle serpentiniti) la distribuzione dei minerali d'amianto non è omogenea a causa dei differenti ambienti geologici che si vengono a creare. Studi condotti da Hora (1997) e Wiebelt et al. (1959) mostrano come la distribuzione di tali mineralizzazioni d'amianto sia spesso associata a zone tettoniche, quindi faglie o zone di taglio, in cui la continuità strutturale della roccia vien meno. Queste superfici di discontinuità rendono l'ammasso sede di circolazione di fluidi (altamente permeabile), perciò la cristallizzazione del minerale richiede non solo

5

¹ Rocce prevalentemente costituite da peridotiti, gabbri, complessi filoniani ed effusioni di composizione basaltica, rocce sedimentarie (silicee e carbonatiche).

processi graduali nel tempo e nello spazio ma anche determinate condizioni termobariche (grado metamorfico medio-basso; Ross (1981); Schreirer (1989)) (Arpa Piemonte, 2008).

Le problematiche essenziali che scaturiscono al momento del rinvenimento dell'amianto in ammassi rocciosi sono associate sia alle caratteristiche del minerale, principalmente nella sfaldabilità e nell'adesione alla matrice rocciosa, sia all'interazione con altre "perturbazioni" che possono contribuire al rilascio di fibre nell'aria. Queste perturbazioni consistono principalmente in processi naturali di degradazione ed alterazione e in attività antropiche (ad es. scavo, movimentazione terra, etc.).

Tabella 1.1 - Principali litotipi della Zona Piemontese potenzialmente contenenti amianto, tratto da: (Compagnoni & Groppo, 2006).

LITOTIPO	MINERALI PRINCIPALI	
ROCCE METAMORFICHE (ofioliti e meta-ofioliti)		
PERIDOTITI	Olivina, Opx, Cpx ± spinello ± plagioclasio (± Grt)	
SERPENTINITI E SERPENTINOSCISTI	Serpentino (Atg, Lz) magnetite \pm olivina \pm diopside \pm crisotilo \pm tremolite \pm talco \pm brucite	
SCISTI ACTINOLITICI	Actinolite, clorite, talco \pm epidoto \pm albite \pm magnetite	
CLORITOSCISTI	Clorite, tremolite-actinolite ± titanite ± magnetite	
TALCOSCISTI	Talco \pm clorite \pm tremolite-actinolite \pm titanite	
PRASINITI	Albite, epidoto, tremolite-actinolite \pm glaucofane \pm mica bianca \pm titanite	
ECLOGITI	Onfacite, granato, rutilo \pm Na-anfibolo (glaucofane) \pm Na-Ca anfibolo (barroisite, winchite)	
ANFIBOLITI ad Ab ed Ep	Orneblenda, albite, epidoto, clorite	
OFICARBONATITI	Serpentino (Atg, Lz), carbonati (Cal, Dol, Mgs), tremolite ± diopside ± crisotilo ± magnetite ± clorite ± talco	
ROCCE METASOMATICHE	Tremolite-actinolite, carbonati \pm quarzo	
ROCCE SEDIMENTARIE		
ROCCE E SEDIMENTI CLASTICI	Tutti i minerali dei litotipi ofiolitici	

1.1 PROPRIETÀ TECNICHE ED USI DELL'AMIANTO

La struttura fibrosa conferisce all'amianto delle proprietà che in passato lo hanno reso idoneo per impieghi nel comparto industriale, edilizio ed in altre applicazioni tecnologiche.

Tali proprietà si identificano in:

- Resistenza chimico fisica;
- Flessibilità;
- Ottime proprietà meccaniche;
- Resistenza al calore e al fuoco;
- Resistenza all'azione di agenti chimici e biologici;
- Proprietà termoisolanti;
- Potere fonoassorbente;
- Resistenza elettrica;
- Potere adsorbente;
- Friabilità.

Quest'ultima caratteristica possiede una rilevanza maggiore, in quanto l'amianto è formato da fibre che hanno la particolarità di suddividersi longitudinalmente riducendo la loro dimensione (anche inferiore al centesimo di micron), definendo così una situazione di elevata pericolosità se la fibra viene inalata.

È quindi necessario tener conto della friabilità (o sfaldabilità) dell'amianto, la caratteristica per cui semplici azioni esterne, condotte direttamente sul minerale o su manufatti che lo contengono, possono contribuire alla dispersione di fibre nell'ambiente. Tale proprietà consente di distinguere due tipologie di materiali contenenti amianto: *materiali friabili* a scarsa coesione interna, che possono essere sbriciolati o ridotti in polvere mediante la semplice pressione delle dita o attraverso altri fattori di deterioramento (ad esempio vibrazioni, correnti d'aria o infiltrazioni d'acqua), e *materiali compatti* o duri, che possono essere sbriciolati o ridotti in polvere mediante il solo impiego di attrezzature meccaniche quali dischi abrasivi, frese, trapani, etc. (Amico & Bellomia, 2003).

Ne consegue che manufatti o materiali contenenti amianto (MCA) privi di matrice o con matrice friabile saranno considerati maggiormente pericolosi rispetto a quelli con matrice compatta. È quindi necessario accertare l'effettiva presenza di tali manufatti, in

edifici o impianti datati (risalenti agli anni '60-'70), attraverso un processo articolato in più fasi e mostrato in **Figura 1.2**.

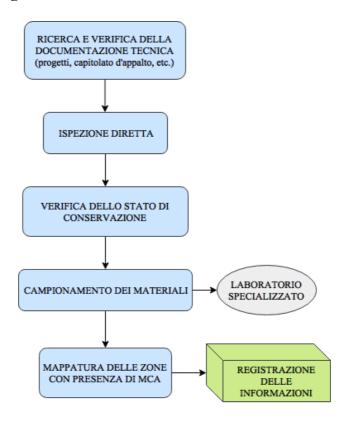


Figura 1.2 - Accertamenti per la bonifica di materiali contenenti amianto (MCA).

L'azione di ispezione viene preceduta da un'analisi approfondita della documentazione tecnica disponibile sull'edificio oggetto di valutazione, al fine di ottenere informazioni utili sulla presenza o assenza di amianto.

In seguito, l'ispezione diretta e 'visiva' interesserà l'osservazione e successiva valutazione dello stato di conservazione del manufatto. L'indagine si costruisce quindi attraverso la definizione di parametri indicatori dello stato, quali:

- la presenza di guaine di rivestimento o trattamenti superficiali (incapsulamento);
- l'alterazione della superficie, dovuta a fessurazioni (sfaldamenti) o fenomeni di erosione superficiale con evidente affioramento di fibre;
- l'aderenza al supporto, dovuta all'evidente presenza di distacchi e da movimentazioni sotto sola pressione manuale;

• la coesione interna legata alla caratteristica di friabilità del manufatto e quindi alla possibilità che possano liberarsi o meno fibre attraverso la semplice azione manuale.

In base allo stato di rinvenimento del materiale verranno adoperati opportuni accorgimenti, quali: la bonifica² per materiali friabili estremamente danneggiati (area del danno estesa), o controlli periodici con eventuale manutenzione per materiali integri o suscettibili o meno (poiché compatti) al danneggiamento (**Figura 1.3**).

Vengono riassunte in **Figura 1.4** le passate e principali applicazioni delle fibre di amianto nei differenti settori e in **Tabella 1.2** i luoghi in cui tale minerale è stato maggiormente adoperato, in funzione delle proprietà d'impiego.

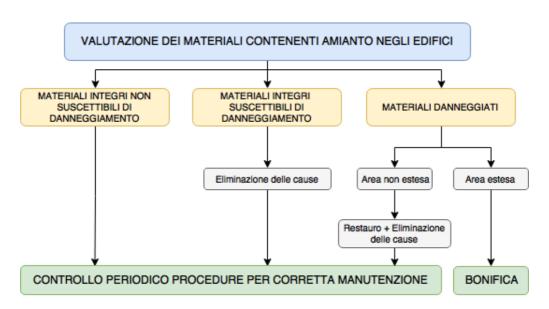


Figura 1.3 - Azioni da intraprendere alla successiva valutazione dello stato dei materiali contenenti amianto (in riferimento al: D.M. 6/09/1994).

• Rimozione dei materiali in amianto: intervento definitivo finalizzato all'eliminazione di ogni potenziale fonte di rischio. Comporta un rischio elevato per i lavoratori addetti e per la contaminazione ambientale. Produce notevoli quantitativi di rifiuti tossici e nocivi che devono essere correttamente smaltiti;

• Incapsulamento: intervento di tipo conservativo che consiste nell'impregnazione del materiale con prodotti penetranti o ricoprenti, al fine di inglobare le fibre di amianto, ripristinare aderenza al supporto e a costruire una pellicola protettiva sulla superficie esposta;

• Confinamento: intervento di tipo conservativo finalizzato all'istallazione di barriere a tenuta che separino l'amianto dall'ambiente circostante. Se non associato a un intervento incapsulante, il rilascio di fibre continua all'interno del confinamento.

² Dal D.M. 6/09/1994 i metodi di bonifica sono:

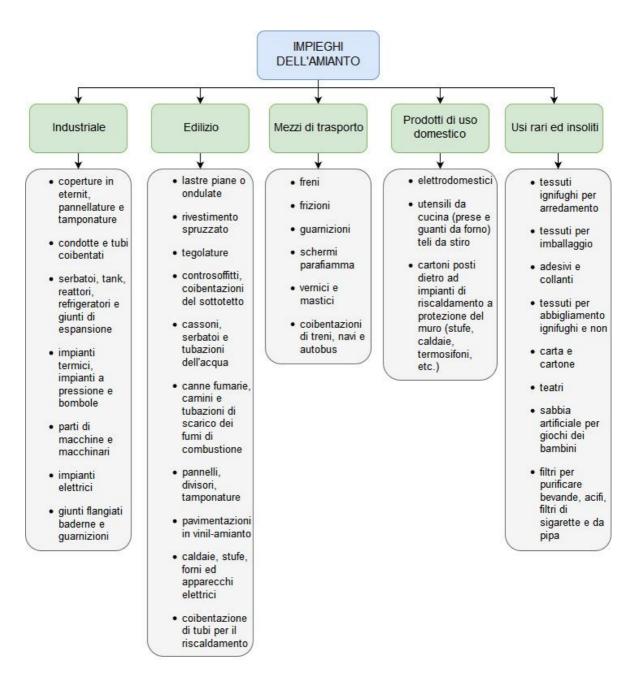


Figura 1.4 - Principali impieghi dell'amianto nel settore industriale, edilizio, domestico e dei trasporti. Informazioni tratte da: (Benvenuti & Di Fabbio, s.d.)

Tabella 1.2 - Luoghi in cui è possibile riscontrare amianto in funzione delle proprietà (Benvenuti & Di Fabbio, s.d.).

Proprietà	Luoghi
Fonoassorbenza	Cinema, chiese, ospedali, mense, palestre, scuole, teatri, etc.
Resistenza al fuoco	Autorimesse, carrozze ferroviarie, centrali elettriche e termiche, navi, etc.
Termoisolante	Carrozze ferroviarie, capannoni industriali, etc.

1.2 RIFERIMENTI STORICI ED EPIDEMIOLOGICI

1.2.1 Storia

Benvenuti e Di Fabbio (s.d.) forniscono indicazioni sulle origini antiche dell'amianto. Da questo documento si evince infatti che manufatti realizzati con tale minerale erano già presenti tra i Persiani e i Romani, impiegati nell'avvolgimento dei cadaveri da cremare; Marco Polo, nelle cronache dei suoi viaggi, ne "Il Milione" citò il "telo di salamandra" come telo resistente al fuoco (al cui contatto diveniva bianco) utilizzato nella produzione di tovaglie. Nel VI secolo, la prescrizione medica di Boezio, medico naturalista, proferiva che: "[...] dall'asbesto si fa spesso un unguento miracoloso per il lattime e per le ulcerazioni delle gambe. Si prendono quattro once di asbesto, due once di piombo, due once di ruta e vengono bruciate, quindi ridotte in polvere vengono macerate in un recipiente di vetro con l'aceto ed ogni giorno, per una volta al giorno per un mese l'impasto viene agitato; dopo un mese si deve far bollire per un'ora e lo si lascia riposare finché non diventi chiaro: poi si mescola una dose di codesto aceto bianco con una ugual dose di olio di rosa finché l'unguento sia ben amalgamato [...]".

I primi impieghi dell'amianto nelle industrie risalgono agli ultimi decenni dell'800 (Età del vapore) quando il mercato dell'amianto ebbe una rapida espansione grazie alla richiesta di materiali aventi idonee capacità di resistenza al calore.

Questo minerale ebbe un grande successo dopo l'incendio verificatosi nella metropolitana di Parigi il 1903, e che portò alla sostituzione di materiali infiammabili con manufatti contenenti amianto. Situazione analoga avvenne sia per la metropolitana di Londra sia per l'esigenza, sul territorio italiano (1950), di coibentare con amianto tutte le carrozze ferroviarie. La pubblicizzazione di questi episodi, connessi al successivo impiego di tale minerale, contribuirono a sostenere la diffusione nel settore edilizio (ospedali, scuole, etc.) ed industriale (Di Maso, 2011).

Significanti produzioni furono incentrate nel cemento-amianto. Iniziate in Austria nel 1893, favorirono l'ingegno Italiano nella creazione di attrezzature idonee a permetterne la produzione (Di Maso, 2011).

Sempre in Italia si evidenzia la presenza di giacimenti di crisotilo e tremolite, localizzati in Valle d'Aosta, Val Malenco (SO) e nelle formazioni alpine Piemontesi (Val di Lanzo, Val di Susa e Val d'Ossola). Tali giacimenti assunsero, a partire dal 1800,

un'elevata rilevanza economica nel settore manifatturiero dei tessili, filati e della carta (Arpa Piemonte, 2008).

1.2.2 Epidemiologia (Conoscenze scientifiche e Patologie)

In questo paragrafo si presenta il progresso delle conoscenze scientifiche e la successiva definizione delle patologie conseguenti dall'esposizione all'amianto.

Le prime segnalazioni degli effetti sulla salute provocati dall'amianto risalgono al 1906 (Londra), anno in cui il dottor Montague Murray trasmise notifica del primo caso di fibrosi polmonare, riscontrato in un lavoratore che riportava una grave condizione di insufficienza respiratoria. In seguito, grazie a Cook (Cook, 1927), si poté coniare il termine di "asbestosi polmonare" (Arpa Piemonte, 2008).

Fu solo attraverso studi epidemiologici, condotti da Doll (1955) e da Wagner et al. (1960), che si riscontrò con certezza la relazione tra l'esposizione ad amianto e l'insorgenza del carcinoma polmonare e del mesotelioma pleurico. Queste scoperte fecero da sfondo ad altri studi nella valutazione degli effetti correlati all'esposizione (Arpa Piemonte, 2008).

Nel 1977 e 1978 l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC, 1977) (IARC, 1987) arrivò ad ottenere risultati che dimostrarono la cancerogenicità dell'amianto per l'uomo (senza alcuna distinzione tra le varie specie) e quindi l'appartenenza di tale minerale al "Gruppo 1 - Cancerogeni per l'uomo".

La pericolosità dell'amianto deriva sia dalla capacità nel rilascio di fibre, specialmente in materiali o minerali friabili, sia da fenomeni (comminuzione) in grado di rendere la fibra piccola, fine e maggiormente dispersa nell'ambiente. Tale situazione può comportare l'esposizione dell'uomo, in ambienti di lavoro o di vita (modelli di esposizione classificati da Peters & Peters (1988)), a fibre che se inalate possono penetrare in profondità nell'apparato respiratorio e bypassare i meccanismi di difesa naturale dei polmoni. È necessario sapere che l'inalazione non è l'unica via di esposizione, anche possibile attraverso l'ingestione.

La definizione di "fibra respirabile", secondo la normativa italiana, fa riferimento alla spiegazione dettata dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 1986) e basata su parametri dimensionali, quali:

- lunghezza maggiore di 5 μm;
- diametro minore di 3 μm;
- rapporto lunghezza/diametro maggiore di 3:1.

Il documento del Ministero della Salute (s.d.) precisa che: "la pericolosità relativa all'inalazione delle fibre dipende dal grado di penetrazione nelle vie respiratorie a sua volta dipendente dalle dimensioni delle fibre: quelle a diametro aerodinamico minore (funzione della geometria e della densità della fibra) sono suscettibili a penetrare più a fondo all'albero bronchiale fino agli alveoli (**Figura 1.5**) [...]; le particelle di diametro maggiore, che si depositano nelle vie aere superiori (nasali e tracheo-bronchiali), possono essere eliminate attraverso il trasporto mucociliare dell'epitelio".

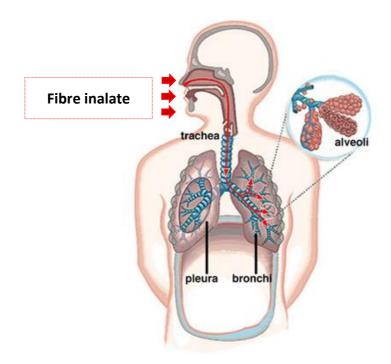


Figura 1.5 - Anatomia del sistema respiratorio, tratta da: (Borin, et al., 2011).

Ne risulta quindi che la natura pericolosa della fibra di amianto (per via inalatoria) sia legata a fattori interconnessi, quali:

- la forma e dimensione;
- la biopersistenza;
- la composizione chimica e reattività della superficie.

Questi aspetti verranno approfonditi più dettagliatamente nel Capitolo 2 in cui si andrà a presentare il minerale oggetto di studio.

Le patologie che si verificano sono prevalentemente a carico dell'apparato respiratorio o della membrana di rivestimento (pleura). Sono gravi, irreversibili e gli effetti non sono immediati poiché la malattia possiede tempi di latenza elevati (circa 10-15 anni per l'asbestosi; circa 20-40 anni per il carcinoma polmonare ed il mesotelioma). Non esistono limiti soglia al di sopra dei quali si può contrarre la malattia. Perciò qualsiasi esposizione può causare il cancro, ma il rischio risulta essere superiore per le persone che hanno inalato o ingerito grandi quantità di amianto per lunghi periodi di tempo.

Si distinguono quindi (**Figura 1.6**):

- l'asbestosi;
- il carcinoma polmonare;
- il mesotelioma (pleurico, peritoneale o pericardico).

Benché più rare, esistono anche altre possibili malattie connesse all'amianto quali: tumori alla laringe, tumori del tratto gastrointestinale e dell'utero. La descrizione di ciascuna patologia viene riportata in seguito.

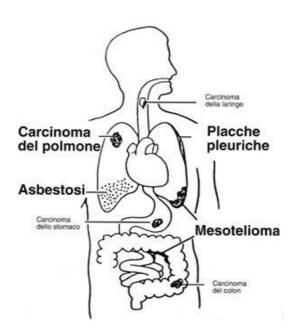


Figura 1.6 - Malattie correlate all'esposizione ad amianto, tratto da: (Arpa Veneto, 2013).

ASBESTOSI

Malattia respiratoria, cronica e diffusa, caratterizzata dallo sviluppo di noduli di tessuto fibroso, causa della cicatrizzazione del tessuto polmonare (fibrosi polmonare). Il progredire della malattia compromette l'elasticità dei polmoni che porta a serie difficoltà nella loro normale attività di espansione e rilassamento, ossia all'insufficienza respiratoria con complicanze cardiocircolatorie (difficoltà nell'ossigenazione del sangue).

I sintomi che si riscontrano sono principalmente: affanno, tosse stizzosa, astenia e talvolta dimagrimento; successivamente compaiono i sintomi dell'alterata funzionalità polmonare.

CARCINOMA POLMONARE

Cancro ai polmoni caratterizzato dalla crescita incontrollata delle cellule nei tessuti polmonari che porta alla formazione del tumore maligno. La crescita del tumore provoca l'ostruzione del passaggio dell'aria.

Il cancro ai polmoni è anche comunemente causato dal fumo ma, lo stesso fumo delle sigarette può amplificare l'effetto cancerogeno insito nell'amianto.

I sintomi che si riscontrano sono: affanno e tosse; a carico della pleura (membrana sierosa a rivestimento dei polmoni) si possono avere diverse manifestazioni patologiche, di diversa gravità, a partire dall'inspessimento pleurico, alla comparsa di placche pleuriche, al mesotelioma maligno.

MESOTELIOMA

Considerata la malattia più grave correlata all'amianto. Colpisce principalmente la pleura (membrana sierosa a rivestimento dei polmoni) e il peritoneo (rivestimento che circonda il tratto digerente superiore), ma può anche svilupparsi nel pericardio (membrana doppio strato a rivestimento del cuore) o nella tunica vaginale (rivestimento sieroso del testicolo).

Il mesotelioma maligno, al contrario del tumore del polmone, è una patologia che individua come unico fattore cagionante l'amianto. Per questo motivo è considerato un "evento sentinella".

I sintomi che si riscontrano sono: la mancanza di respiro; dolori al torace o all'addome (nelle forme toraciche si possono verificare versamenti pleurici accompagnati da affanno, tosse e febbre persistenti).

PLEUROPATIE ASBESTO-CORRELATE

Manifestazioni patologiche, comunemente riscontrate nelle malattie correlate all'amianto, che si verificano per la sensibilità delle membrane a tale minerale. Le patologie che si possono verificare sono:

- pleurite: infiammazione dei due strati pleurici, dettato dall'irruvidimento e successivo sfregamento tra le due membrane.
- versamento pleurico: accumulo di liquido in eccesso tra i due strati pleurici che circondano i polmoni;
- placche pleuriche: ispessimenti fibrosi o di parziale calcificazione;
- ialinosi: degenerazione ialina;
- ispessimento pleurico diffuso: cicatrizzazione, calcificazione e/o ispessimento della pleura;
- atelettasia: collasso o chiusura del polmone con conseguente riduzione o assenza di scambi di aria.

1.2.3 Situazione epidemiologica Italiana

In Italia, nel periodo dal dopoguerra al 1992, è stato osservato un rapido incremento della produzione ed importazione di amianto, con trend e quantità mostrate in **Figura 1.7**.

Questo andamento può essere distinto in tre fasi: la prima associata agli stadi iniziali del processo di estrazione del minerale durata fino agli anni '80 e con andamento prevalentemente crescente; la seconda connessa alla diffusione ed impiego dell'amianto in numerosi settori fino al 1992, vantante andamento decrescente; l'ultima associata alla cessazione e successiva necessità di bonifica e manutenzione, corrispondente a produzioni nulle.

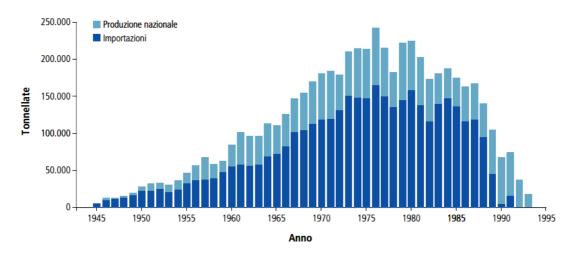


Figura 1.7 - Istogramma sulla produzione nazionale e importazione di amianto tra gli anni 1946 e 1992, tratto da: (Ministero della Salute, 2012).

Dal 2003, in Italia, è stato istituito il Registro Nazionale dei Mesoteliomi (ReNaM) con il fine di condurre stime dettagliate sull'effetto dell'amianto associato alla patologia del mesotelioma. Come mostrato nel grafico di **Figura 1.8**, tratto da Borin et al. (2011), "la curva che descrive l'andamento delle morti per mesotelioma è parallela a quella che descrive il consumo di amianto pro-capite, la segue però con circa quaranta anni di ritardo a conferma del lungo tempo di latenza della patologia." Tale grafico mostra quindi un maggiore consumo di amianto associato all'anno 1976 e di conseguenza ne ipotizza un picco di decessi, atteso con un salto temporale di circa quarant'anni, al 2015 (Borin, et al., 2011).

Nell'ultimo aggiornamento del Rapporto del Registro Nazionale dei Mesoteliomi (ReNaM), numero V, vengono raccolte le misure epidemiologiche di incidenza, latenza, età media alla diagnosi e sopravvivenza per oltre 21463 casi di mesotelioma, diagnosticati dal 1993 al 2012. Il rapporto mostra anche i settori e le mansioni implicate nell'esposizione ad amianto (Marinaccio, et al., 2015).

Sul quinto rapporto è riportato che: "Il 93% dei casi di mesotelioma registrati risulta a carico della pleura [...]. Fino a 45 anni la malattia è rarissima. L'età media alla diagnosi è di 69,2 anni senza differenze apprezzabili per genere (70,2 anni nelle donne e 68,8 negli uomini [...]. Le modalità di esposizione sono state approfondite per 16.511 casi (76,9%) e, fra questi, il 69,5% presenta un'esposizione professionale (certa, probabile, possibile), il 4,8% familiare, il 4,2% ambientale, l'1,6% per un'attività extralavorativa di svago o hobby. Per il 20% dei casi l'esposizione è improbabile o ignota [...]. Considerando l'intera

finestra di osservazione (1993 - 2012) e i soli soggetti colpiti dalla malattia per motivo professionale, i settori di attività maggiormente coinvolti sono l'edilizia (15,2% del totale della casistica), l'industria pesante, ed in particolare la metalmeccanica (8,3%), la metallurgia (3,9%) e le attività di fabbricazione di prodotti in metallo (5,7%); i cantieri navali (6,7%), l'industria del cemento-amianto (3,1%). Il restante quadro è estremamente variegato e frazionato con la presenza di numerosi ambiti produttivi nei quali l'esposizione è avvenuta per la presenza del materiale nel luogo di lavoro e non per uso diretto." (Marinaccio, et al., 2015).

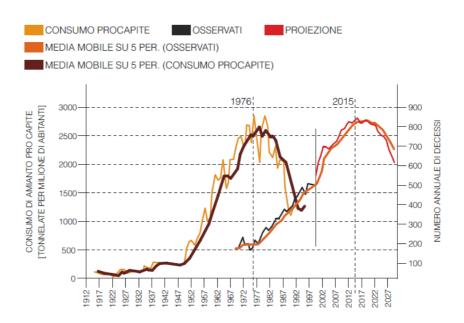


Figura 1.8 - Consumo di amianto pro capite (1951-1992) e decessi per mesotelioma osservati (1970-1999) e previsti (2000-2030) in Italia, tratto da: (Borin, et al., 2011).

1.3 RIFERIMENTI NORMATIVI

Sulla base degli effetti che l'amianto comporta alla salute dei soggetti esposti, a livello occupazionale e non, si è evidenziata negli anni una crescente esigenza mirata ad arrestare i processi di estrazione, impiego e commercializzazione.

I Paesi che ad oggi hanno bandito l'utilizzo dell'amianto sono circa 62, compresi i 28 Stati Membri dell'Unione Europea. In **Tabella 1.3** vengono riportate le nazioni coinvolte.

Tabella 1.3 - Paesi con divieto di produzione ed utilizzo di amianto (Kazan-Allen, 2018).

National Asbestos Bans				
Algeria	Danimarca	Irlanda	Monaco	Seychelles
Argentina	Egitto	Israele	Mozambico	Slovacchia
Australia	Estonia	Italia	Paesi Bassi	Slovenia
Austria	Finlandia	Japan	Nuova Caledonia	Sud Africa
Bahrain	Francia	Giordania	Nuova Zelanda	Spagna
Belgio	Gabon	Korea (Sud)	Norvegia	Svezia
Brasile	Germania	Kuwait	Oman	Svizzera
Brunei	Gibilterra	Lettonia	Polonia	Turchia
Bulgaria	Grecia	Lituania	Portogallo	Regno Unito
Cile	Honduras	Lussemburgo	Qatar	Uruguay
Croazia	Ungheria	Macedonia	Romania	
Cipro	Islanda	Malta	Sud Arabia	
Repubblica Ceca	Iraq	Mauritius	Serbia	

Tuttavia esistono altri Paesi in cui parte dell'economia rimane ancora incentrata sulla produzione e/o consumo di amianto. Importanti cambiamenti avvenuti nella commercializzazione di tale minerale risalgono al 1977, anno in cui molti tra i "Paesi industrializzati" decisero di allontanarsi dal mercato della produzione, estrazione e/o consumo di amianto (**Figura 1.9**), causandone però l'avvicinamento dei "Paesi in via di sviluppo" (Tailandia, India, Indonesia, Ucraina e Vietnam). Ad oggi, il primo Paese

produttore di amianto è la Russia, seguita da Cina, Kazakhstan, Canada e Zimbabwe (Carnevale, 2011).

L'Italia è stata una tra i primi a proibire l'impiego di tale minerale fibroso da qualsiasi attività professionale ad esso correlate. Tale obiettivo viene raggiunto grazie all'emanazione, il 27 marzo 1992, della Legge 257 "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto", finalizzata a "vietare l'estrazione, l'importazione, l'esportazione, la commercializzazione e la produzione di amianto, di prodotti di amianto o di prodotti contenenti amianto" e a definire "misure di decontaminazione e di bonifica delle aree interessate dall'inquinamento da amianto".

Differente invece è la presa di posizione del Canada. Dall'articolo di Terracini (2017) si evidenzia come nel 2016 sia entrato in vigore il solo divieto di impiego di amianto nelle costruzioni e si presume che in un secondo momento, stimato al 2018, questo venga esteso anche alla produzione, commercio, importazione ed esportazione.



Figura 1.9 - Mappa mondiale dei paesi con divieto di uso e produzione di amianto, tratta da: (Asbestos Nation, s.d.).

La base normativa associata al delicato tema dell'amianto, vede a livello Europeo l'elaborazione di specifiche Direttive e Regolamenti atti a realizzarne l'obiettivo imposto. Si vincolano perciò gli Stati membri, tra cui l'Italia, al recepimento di tale direttive nel sistema normativo nazionale.

Nei paragrafi successivi si citano i rifermenti normativi Europei ed Italiani.

1.3.1 Normativa europea

L'Unione Europea delinea le Direttive e Regolamenti in materia di "amianto", al fine di armonizzare le normative degli Stati Membri e vincolarli per quanto riguarda il risultato da raggiungere.

In seguito si citano le Direttive Europee (Arpa Piemonte, s.d.) (ASSOAMIANTO, s.d.):

- Direttiva 83/477/CEE n.477 del 19/09/1983: "Direttiva del Consiglio sulla protezione dei lavoratori contro i rischi connessi con un'esposizione all'amianto durante il lavoro (seconda direttiva particolare ai sensi dell'articolo 8 della direttiva 80/1107/CEE)".
- Direttiva 83/478/CEE n.478 del 19/09/1983: "Direttiva del Consiglio recante la quinta modifica (amianto) della direttiva 76/769/Cee per il ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari ed amministrative degli Stati membri relative alla restrizione in materia di immissione sul mercato e di uso di talune sostanze e preparati pericolosi"
- Direttiva 87/217/CEE n.217 del 19/03/1987: "Direttiva del Consiglio, concernente la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento dell'ambiente causato dall'amianto".
- Direttiva 1999/77/CE n.77 del 26/07/1999: "adegua per la sesta volta al progresso tecnico l'allegato I della direttiva 76/769/CEE dove gli stati membri mettono in vigore le disposizioni legislative, regolamentari e amministrative relative alle restrizioni in materia di immissione sul mercato e di uso di talune sostanze e preparati pericolosi, ovvero l'uso di amianto e dei prodotti che lo contengono".
- Direttiva 2003/18/CE n.18 del 27/03/2003: "Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, modifica la Direttiva 83/477/CEE del Consiglio sulla protezione dei lavoratori contro i rischi connessi con un'esposizione all'amianto durante il lavoro".
- Direttiva 2004/37/CE n.37 del 29/04/2004: "Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da un'esposizione ad agenti cancerogeni o mutageni durante il lavoro (sesta direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1 della direttiva

- 89/391/CEE del Consiglio). Questa direttiva si applica all'amianto e prevede disposizioni più favorevoli alla salute e alla sicurezza sul luogo di lavoro rispetto a quelle della direttiva 83/477/CEE" (EUR-Lex, s.d.).
- Regolamento CE n. 1272/2008 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2008 "relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e che reca modifica al regolamento (CE) n. 1907/2006" (EUR-Lex, s.d.)
- Direttiva 2009/148/CE n.148 del 30/11/2009: "Relativa alla protezione dei lavoratori contro i rischi connessi con un'esposizione all'amianto durante il lavoro, per la bonifica dell'amianto e dei materiali contenenti amianto nei locali pubblici o aperti al pubblico, per la progressiva sostituzione dei materiali in amianto con altri prodotti di uso equivalente, nonché in materia di eguaglianza nell'accesso ai benefici previdenziali per i lavoratori esposti all'amianto".

Si riscontrano anche le Linee guida per la qualità dell'aria in Europa di pubblicazione dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2000).

1.3.2 Normativa italiana

Le prime disposizioni italiane che disciplinano l'uso dell'amianto risalgono al 1986, con il recepimento della direttiva europea 83/478/CEE relativa alla restrizione in materia di immissione sul mercato e di uso di tali sostanze e preparati pericolosi.

Successivamente la legislazione in materia 'amianto' si accresce di leggi e decreti operanti sull'ambiente (restrizione/divieti nell'impiego di amianto), sulla protezione dei lavoratori e sulla prevenzione da situazioni di inquinamento.

Nel tema di **restrizione e divieto d'impiego di amianto** si citano (Arpa Piemonte, s.d.) (ASSOAMIANTO, s.d.):

- Circolare del Ministero della Sanità n. 45 del 10/07/1986: "Piano di interventi e misure tecniche per la individuazione ed eliminazione del rischio connesso all'impiego di materiali contenenti amianto in edifici scolastici e ospedalieri pubblici e privati".
- D.P.R. n.215 del 24/05/1988: "Attuazione delle direttive CEE numeri 83/478/ e 85/610 recanti, rispettivamente, la quinta e la settima modifica (amianto) della direttiva CEE n. 76/769 per il ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari ed amministrative degli Stati membri relative alle restrizioni in materia di immissione sul mercato e di uso di talune sostanze e preparati pericolosi, ai sensi dell'art. 15 della legge 16 aprile 1987, n. 183".
- Legge n.257 del 27/03/1992: "LEGGE FONDAMENTALE" "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto" ed in particolare "al divieto di estrazione, importazione, esportazione, commercializzazione e produzione di amianto, di prodotti di amianto e di prodotti contenenti amianto". Inoltre, introduce articoli per la tutela dell'ambiente e la salute (classificazione, imballaggio, etichettatura, controllo delle dispersioni durante le lavorazioni, rimozione dell'amianto e piani regionali e delle province autonome) e definisce criteri per il finanziamento delle imprese interessate alla riconversione produttiva e per i benefici previdenziali a favore dei lavoratori occupati nella produzione dell'amianto.

- D.M. 12/02/1997³: "Criteri per l'omologazione dei prodotti sostitutivi dell'amianto".
- D.M. 20/08/1999⁴ e s.m.i.: "Ampliamento delle normative e delle metodologie tecniche per gli interventi di bonifica, ivi compresi quelli per rendere innocuo l'amianto, previsti dall'art. 5, comma 1, lettera f), della legge 27 marzo 1992, n. 257, recante norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto".
- Deliberazione del 1/02/2000: "Criteri per l'iscrizione all'albo nella categoria
 10: bonigfica dei beni contenenti amianto".
- D.M. del 25/07/2001⁵: "Rettifica al decreto 20 agosto 1999, concernente "Ampliamento delle normative e delle metodologie tecniche per gli interventi di bonifica, ivi compresi quelli per rendere innocuo l'amianto, previsti dall'articolo 5, comma 1 lettera f), della legge 27 marzo n. 257, recante norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto".
- D.P.C.M. n.308 del 10/12/2002: "Regolamento per la determinazione del modello e delle modalità di tenuta del registro dei casi di mesotelioma asbesto correlati ai sensi dell'articolo 36, comma 3, del decreto legislativo n. 277 del 1991".
- Circolare Albo Nazionale Gestori Rifiuti n.2700 del 21/04/2004:
 "Applicazione del D.M. 5 febbraio 2004 relativo alle modalità ed importi delle garanzie finanziarie che devono essere prestate a favore dello Stato dalle imprese che effettuano le attività di bonifica dei beni contenenti amianto".
- D.M. del 14/12/2004: "Divieto di installazione di materiali contenenti amianto intenzionalmente aggiunto".
- D.Lgs. n.152 del 3/04/2006: "CODICE DELL'AMBIENTE" "Norme in materia d'ambiente".

⁴ Decreto di attuazione nato col fine di disciplinare gli obiettivi previsti dalla Legge n.257 del 27/03/1992 - "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto".

³ Decreto di attuazione nato col fine di disciplinare gli obiettivi previsti dalla Legge n.257 del 27/03/1992 - "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto".

⁵ Decreto di attuazione nato col fine di disciplinare gli obiettivi previsti dalla Legge n.257 del 27/03/1992 - "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto".

- D.Lgs. n.257 del 25/07/2006: "Attuazione alla direttiva CEE 2003/18/CE relativa alla protezione dei lavoratori dai rischi derivanti dall'esposizione all'amianto durante il lavoro".
- D.Lgs. n.161 del 10/08/2012: "Terre e rocce da scavo" "Regolamento recante la disciplina dell'utilizzazione delle terre e rocce da scavo".
 All'allegato 4 "Procedure di caratterizzazione chimico-fisiche e l'accertamento delle qualità ambientali", si stabilisce che:
 - 1. "I campioni da portare in laboratorio o da destinare ad analisi in campo dovranno essere privi della frazione maggiore di 2 cm (da scartare in campo) e le determinazioni analitiche in laboratorio dovranno essere condotte sull'aliquota di granulometria inferiore a 2 mm. La concentrazione del campione dovrà essere determinata riferendosi alla totalità dei materiali secchi, comprensiva anche dello scheletro campionato (frazione compresa tra 2 cm e 2 mm);
 - 2. Nel set minimale di parametri analitici da considerare, è compreso il parametro amianto;
 - I risultati delle analisi sui campioni dovranno essere confrontati con le Concentrazioni Sogli di Contaminazione di cui alle colonne A e B tabella 1 in allegato 5, al titolo V parte IV del decreto legislativo n.152 del 2006;
 - 4. Le analisi chimico fisiche saranno condotte adottando metodologie ufficialmente riconosciute, tali da garantire l'ottenimento di valori 10 volte inferiori rispetto ai valori di concentrazione limite;
 - 5. Nell'impossibilità di raggiungere tali limiti di quantificazione dovranno essere utilizzate le migliori metodologie analitiche ufficialmente riconosciute;
 - 6. Il rispetto dei requisiti di qualità ambientale di cui all'art. 184 bis comma 1 lettera d) del D.Lgs.152/2006per l'utilizzo dei materiali da scavo come sottoprodotti, è garantito quando il contenuto di sostanze inquinanti all'interno dei materiali da scavo sia inferiore alla Concentrazione Soglia di Contaminazione (CSC);
 - 7. I materiali da scavo sono utilizzabili per reinterri, riempimenti, rimodellazioni, ripascimenti, interventi in mare, miglioramenti fondiari ecc., se:

- a. Se la concentrazione d'inquinanti rientra nei limiti di cui alla colonna A tabella 1 in allegato 5, al titolo V parte IV del decreto legislativo n.152 del 2006, in qualsiasi sito a prescindere dalla sua destinazione:
- b. Se la concentrazione di inquinanti è compresa fra i limiti di cui alla colonna A e B tabella 1 in allegato 5, al titolo V parte IV del decreto legislativo n.152 del 2006, in siti a destinazione produttiva (commerciale e industriale)".
- Legge n. 98 del 9/08/2013: All' art. 41 si definiscono le "Ulteriori disposizioni in materia di terre e rocce da scavo".
- D.P.R. n.120 del 13/06/2017: "Nuovo terre e rocce da scavo" "Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo, ai sensi dell'articolo 8 del decreto-legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito, con modificazioni, dalla legge 11 novembre 2014, n. 164". Si disciplina nello specifico:
 - a) "la gestione delle terre e rocce da scavo qualificate come sottoprodotti";
 - b) "il deposito temporaneo delle terre e rocce da scavo qualificate come rifiuti";
 - c) "l'utilizzo nel sito di produzione delle terre e rocce da scavo escluse dalla disciplina dei rifiuti";
 - d) "la gestione delle terre e rocce da scavo nei siti oggetto di bonifica".

Assicura adeguati livelli di sicurezza ambientale e sanitaria, garantiti attraverso attività di gestione e vigilanza efficaci, da parte delle autorità competenti".

Nel tema della mappatura delle zone del territorio nazionale con presenza di amianto si citano:

 D.M. n.101 del 18/03/2003: "Regolamento per la realizzazione di una mappatura delle zone del territorio nazionale interessate dalla presenza di amianto, ai sensi dell'articolo 20 della legge 23 marzo 2001, n. 93".

Nel tema della **protezione dei lavoratori** si citano:

- D.P.R. n.1124 del 30/06/65: "Testo unico delle disposizioni per l'assicurazione obbligatoria contro gli infortuni e le malattie professionali".
- Decreto Interministeriale del 18/04/1973: "Elenco delle malattie per le quali è obbligatoria la denuncia contro gli infortuni sul lavoro e le malattie professionali".
- Decreto Interministeriale del 16/10/1986: "Integrazione delle norme del decreto del Presidente della Repubblica 9 aprile 1959, n. 128, in materia di controllo dell'aria ambiente nelle attività estrattive dell'amianto".
- Decreto del Ministero del Lavoro e della Providenza Sociale del 21/01/1987:
 "Norme tecniche per l'esecuzione di visite mediche periodiche ai lavoratori esposti al rischio di asbestosi".
- Decreto del Ministero del Lavoro e della Providenza Sociale del 20/06/1988:
 "Nuova tabella dei tassi di premio supplementare per l'assicurazione contro la silicosi e l'asbestosi, e relative modalità di applicazione".
- D.Lgs. n.277 del 15/08/1991: "Attuazione delle direttive n. 80/1107/CEE, n. 82/605/CEE, n. 83/477/CEE, n. 86/188/CEE e n. 88/642/CEE, in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro, a norma dell'articolo 7 della legge 30 luglio 1990, n. 212".
- D.Lgs. n.81 del 09/04/2008: "Testo unico in materia di sicurezza sul lavoro" "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n.123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".
- D.Lgs. n.106 del 03/08/2009: "Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".
- Circolare del Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali del 25/01/2011: "Esposizioni sporadiche e di debole intensità (ESEDI) all'amianto nell'ambito delle attività previste dall'art. 249 commi 2 e 4, del D.Lgs. 9 aprile 2008, n.81".

Nel tema di prevenzione e riduzione dell'inquinamento si citano:

- D.M. n.248 del 29/07/2004: "Regolamento relativo alla determinazione e disciplina delle attività di recupero dei prodotti e beni di amianto e contenenti amianto".
- D.Lgs. n.114 del 17/03/1995: (modificato dal D.Lgs. 389/97 e dalla Legge 426/98) "Attuazione della direttiva 87/217/CEE in materia di prevenzione e riduzione dell'inquinamento dell'ambiente causato dall'amianto"; vengono definiti i "valore limite delle emissioni in atmosfera e negli effluenti liquidi, la disciplina delle attività di demolizione di manufatti e di rimozione di amianto o di materiali contenenti amianto e la raccolta e la trasmissione dei dati".
- D.Lgs. n.22 del 5/02/1997: "Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio" (Decreto Ronchi).
- Legge n.426 del 9/12/1998: "Nuovi interventi in campo ambientale" che definisce "interventi di bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati" e "interventi per la conservazione della natura".
- D.P.R. del 8/08/1994: "Atto di indirizzamento e coordinamento alle Regioni e alle Province autonome di Trento e Bolzano per l'adozione di pian di protezione, di decontaminazione, di smaltimento e di bonifica dell'ambiente, ai fini della difesa dai pericoli derivanti dall'amianto".
- Circolare del Ministero della Sanità n. 45 del 10/07/1986: "definisce il piano di intervento e le misure tecniche per l'individuazione e l'eliminazione del rischio connesso all'impiego di materiali contenenti amianto in edifici scolastici ed ospedalieri pubblici e privati".
- D.M. n.471 del 25/10/1999: "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n.22, e successive modificazioni e integrazioni".
- D.M. del 3/05/2005: "Definizione dei criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica". "I rifiuti sono ammessi in discarica solo se risultano conformi ai criteri di ammissibilità della corrispondente categoria di discarica secondo quanto stabilito dal presente decreto". "Tenuto conto che le discariche per rifiuti pericolosi hanno un livello di tutela ambientale superiore a quelle per i

rifiuti pericolosi e a quelle per rifiuti inerti, è ammesso il conferimento di rifiuti che soddisfano i criteri per l'ammissione ad ogni categoria di discarica in discariche aventi un livello di tutela superiore".

• D.M. del 26/04/89: "Catasto nazionale dei rifiuti speciali".

I disciplinari tecnici sono riportati in seguito:

- D.M. del 6/09/1994: "Normative e metodologie tecniche di applicazione dell'art.6, comma 3 e dell'art. 12, comma 2, della legge 27 marzo 1992 n. 257, relativa alla cessazione dell'impiego dell'amianto". Esse riguardano:
 - 1. "Normative e metodologie tecniche per la valutazione del rischio, il controllo, la manutenzione e la bonifica di materiali contenenti amianto presenti nelle strutture edilizie;
 - 2. Determinazione quantitativa dell'amianto in campioni in massa, aspetti generali del problema analitico;
 - 3. Determinazione quantitativa delle concentrazioni di fibre di amianto aerodisperse in ambienti indoor;
 - 4. Identificazione qualitativa delle fibre di amianto mediante la tecnica della dispersione cromatica in microscopia ottica;
 - 5. Criteri per una corretta scelta dei mezzi di protezione individuali delle vie respiratorie;
 - 6. Scheda per l'accertamento della presenza di materiali contenenti amianto negli edifici".
- D.M. del 26/10/1995: "Normative e metodologie tecniche per la valutazione del rischio, il controllo, la manutenzione e la bonifica dei materiali contenenti amianto presenti nei mezzi rotabili".
- D.M. del 14/05/1996: "Normative e metodologie tecniche per gli interventi di bonifica, ivi compresi quelli per rendere innocuo l'amianto, previsti dall'art. 5, comma 1, lettera f), della legge 27 marzo 1992, n. 257, recante: "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto"".
- D.M. del 07/07/1997: "Approvazione della scheda di partecipazione al programma di controllo di qualità per l'idoneità dei laboratori di analisi che operano nel settore amianto".

1.3.3 Limiti di legge

I limiti associati al rischio amianto differiscono non solo sulla base normativa, ma anche sulle metodologie di misura e sui livelli di accettabilità. Tali valori, riportati in Tabella 1.4, vengono inoltre suddivisi in base alla modalità con le quali l'amianto viene immesso all'interno o all'esterno di un ambiente.

Prima del recepimento delle direttive europee e l'entrata in vigore del D.Lgs. 277/91, le cautele occupazionali previste sull'esposizione ad amianto facevano riferimento a Valori Limite di Soglia (TLV) previsti dall'ACGIH⁶ (Benvenuti & Di Fabbio, s.d.). Successivamente, sono state introdotte dal decreto legislativo in questione soglie più restrittive e differenti per le diverse varietà di amianto.

Considerando principalmente l'amianto come fibra aerodispersa nell'ambiente, è possibile distinguere due approcci di studio: uno basato sull'ambiente di lavoro e l'altro sull'ambiente di vita.

Per l'esposizione ad amianto negli ambienti lavorativi si fa riferimento al valore limite di 100 f/l (su media giornaliera), previsto dal D.Lgs. 81/2008.

Per gli ambienti di vita invece, si fa riferimento ai valori guida definiti dal D.M. 6/09/1994 e corrispondenti a 20 f/l con osservazione al microscopio ottico a contrasto di fase (MOCF) per verificare un inquinamento in atto e a 2 f/l con microscopio elettronico a scansione (SEM) per la restituibilità di un luogo a seguito di una bonifica.

⁶ American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) organizzazione

statunitense che si occupa dal 1938 della salute e sicurezza dei lavoratori.

Tabella 1.4 - Limiti previsti nella Legislazione Italiana sull'amianto, tratta da: (Borin, et al., 2011).

Applicazione	Valori limite	Metodo analitico	Riferimento Legislativo
AMBIENTE DI LAVORO			
TLV-TWA (Valore limite di esposizione misurata come media ponderata nel tempo di riferimento di otto ore)	100 f/l	MOCF	T.U. della Sicurezza (D.Lgs. 81/2008), Art. 254, comma 1
AMIANTO NEGLI EDIFICI - AN	MBIENTI DI VITA	1	
Valore indicativo di inquinamento	20 f/l	MOCF	D.M. 6/09/94,
in atto in un edificio (media su 3 campionamenti)	2,0 f/l	SEM	Punto 2c
INTERVENTI DI BONIFICA			
Soglia di pre-allarme per il monitoraggio delle aree circostanti il cantiere di bonifica	Netta tendenza verso un aumento della concentrazione di fibre aerodisperse	MOCF	D.M. 6/09/94 Punto 11/1
Soglia di allarme per il monitoraggio delle aree circostanti il cantiere di bonifica	50 f/l	MOCF	D.M. 6/09/94, Punto 11/2
Monitoraggio interno al cantiere di bonifica per la restituibilità ambienti bonificati	2,0 f/l	SEM	D.M. 6/09/94, Punto 6/b
SITI CONTAMINATI DA AMIAN	NTO		
Valore limite di concentrazione nel suolo	1000 mg/kg	DRX-FTIR	CODICE AMBIENTE (D.Lgs. 152/2006) Parte IV - Titolo V - Allegato 5 - Tabella 1
EMISSIONI IN ATMOSFERA			
Concentrazione di amianto negli scarichi emessi in atmosfera attraverso i condotti di scarico	0,1 mg/m³ di aria emessa	Gravimetrico	D.Lgs. 114/95 Art. 1, comma 1

	2000 f/l	MOCF	D.Lgs. 114/95 Art. A, II
EFFLUENTI LIQUIDI			
Concentrazione di amianto negli scarichi emessi in atmosfera attraverso i condotti di scarico	30 g di materia totale in sospensione per m3 di effluente liquido scarico	Filtrazione su membrana	D.Lgs. 114/95 Art. 2, comma 1
SITI ESTRATTIVI DI PIETRE VERDI			
Valore limite per definire la pericolosità dei materiali estratti	0,1	Indice di rilascio	D.M. 14/05/96 Allegato 4

2 LA TREMOLITE IN NATURA:

PRISMATICA E FIBROSA

La tremolite è un silicato idrato di calcio e magnesio (Ca₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂) caratterizzato da un reticolo cristallino tipico dei silicati, più precisamente inosilicati. Tale struttura è organizzata da doppie catene di tetraedri di ossido di silicio (SiO₄) lunghe e parallele che condividono tre dei quattro ossigeni presenti; tra le doppie catene si sviluppa una striscia cationica (**Figura 2.1**).

Si riportano in **Tabella 2.1** le principali proprietà della tremolite.

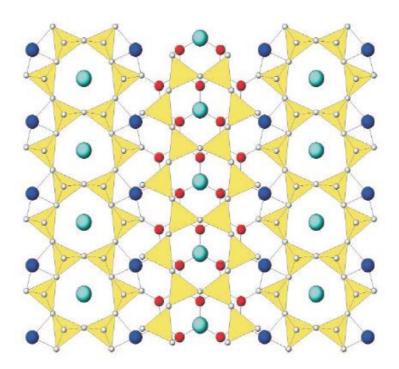


Figura 2.1 - Struttura della tremolite con osservazione perpendicolare all'asse z; sono mostrati: in giallo i tetraedri (SiO₄) con al vertice gli ossigeni (sfere grigie), sfere rosse a rappresentare Mg, quelle blu Ca e quelle azzurre (grandi) OH. Tratta da: (Compagnoni , et al., 1983).

Tabella 2.1 - Proprietà della tremolite.

Proprietà della tremolite		
Colore	Incolore, bianca, grigia, verde chiaro, giallo chiaro, rosa-viola	
Durezza (Mohs)	5,0 – 6,5	
Densità (g/cm³)	3,0	
Sfaldatura o clivaggio	Buona secondo (110); parziale secondo (100)	

Questo minerale, appartenente al gruppo degli anfiboli, può presentarsi con abiti cristallini molto differenti (**Figura 2.2**): è frequente riscontrare l'abito *prismatico* o *non asbestiforme*, ma è possibile individuare anche quello *fibroso asbestiforme*.

La distinzione morfologica tra i due abiti viene definita dal National Research Council (1984), il quale definisce:

- abito "asbestiforme" (o fibroso): la struttura caratterizzata da cristalli che appaiono simili a delle fibre organiche (cotone o capelli) oppure costituiti da aggregati cristallini (fasci comunemente con estremità aperte) composti da tante fibre parallele. Le fibre quindi si presentano come elementi lunghi, sottili ed aguzzi (Dana & Ford, 1932). Dal punto di vista geologico la crescita del cristallo è unidirezionale e produce fibre estremamente lunghe e sottili, note come "fibrille".
- abito "non asbestiforme" (o prismatico): struttura costituita da prismi, anche a forma irregolare, o da cristalli a crescita aciculare. Si presentano allungati e con una sezione trasversale sagomata a losanga; la crescita cristallina si verifica lungo due o tre piani (Addison & McConnell, 2008).

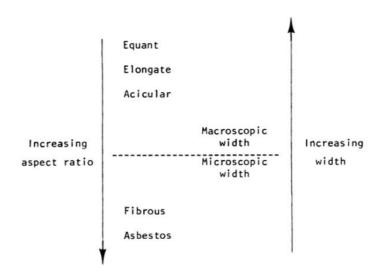


Figura 2.2 - Esempio di terminologia nella distinzione degli abiti cristallini degli anfiboli, tratto da: (Campbell, et al., 1979).

Queste forme cristalline derivano principalmente dalla presenza di zone di taglio, faglie e da processi di alterazione idrotermale. Si trovano infatti associate a particolari contesti geologici in cui l'amianto può essere rinvenuto come: aggregati di fibre a

riempimento di fessure planari (vene), fibre sviluppate su superfici di taglio o superfici appartenenti a faglie, oppure come fibra diffusa formatasi dall'alterazione idrotermale (Meeker, et al., 2003). Tali distinzioni nella forma derivano perciò da particolari cambiamenti nella struttura cristallina, che ne comportano tuttavia profonde variazioni nelle proprietà fisiche (Langer, et al., 1991). È proprio la struttura il parametro di fondamentale importanza da analizzare a seguito dell'azione di comminuzione, che può incidere sia sulla distribuzione dimensionale delle polveri che sulla cancerogenicità potenziale all'inalazione.

In riferimento all'obiettivo di questo lavoro di tesi, finalizzato a comprendere l'effetto della macinazione sul minerale anfibolico della tremolite, è necessario introdurre un'ulteriore chiarimento sulle differenti modalità con le quali il cristallo tende a scindersi o rompersi in funzione dell'abito cristallino. L'abito asbestiforme include tutti quei minerali che possiedono la propensione a scindersi longitudinalmente alla lunghezza e quindi a separarsi in "fibrille" di diametro sempre più piccolo (Dorling & Zussman, 1987), caratterizzate prevalentemente da superfici lisce; l'abito non asbestiforme (o prismatico), comprende minerali all'interno dei quali si verificano fenomeni di "cleavage", ovvero di rottura preferenziale lungo i piani di debolezza strutturale, noti come "piani di clivaggio" (Figura 2.3a). Un cristallo avente tre o più piani di clivaggio tenderà a fratturarsi producendo frammenti poliedrici; la presenza di due piani di clivaggio distinti concorre alla formazione di frammenti aciculari (Figura 2.3b), mentre la presenza di un singolo piano vede la generazione di frammenti prismatici. La rottura di ciascun frammento porta alla formazione di superfici ad elevata densità di difetti superficiali (fessure e crepe).

Questi piani di frattura, longitudinali o trasversali, nei cristalli non asbestiformi non sono né perfetti né continui e tendono ad assumere tra di loro una maggiore spaziatura. Si deduce quindi il comportamento del cristallo ad eventuali macinazioni, ovvero l'attitudine di subire delle rotture prevalentemente trasversali alla lunghezza (ma anche longitudinali) e quindi la tendenza all'incremento di frammenti denominati "di clivaggio". È evidente che la rottura del cristallo prismatico non può produrre un'elevata resistenza o flessibilità. Lo studio condotto da O'Hanley (1986) mostra che le misure dirette di resistenza a trazione nei frammenti post-comminuzione ne evidenziano la debolezza e una minore flessibilità degli stessi rispetto ad altre fibre d'amianto della stessa lunghezza.

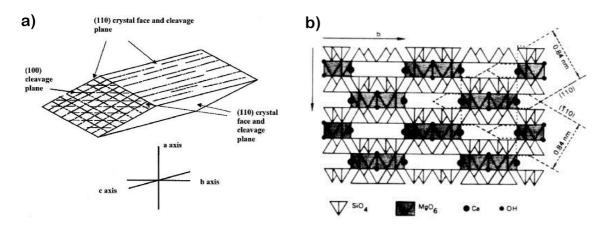


Figura 2.3 - Piani di debolezza strutturale: (a) tipica forma di cristallo prismatico di anfibolo; si evidenziano le sfaccettature e i piani di clivaggio, tratto da: (Addison & McConnell, 2008) (b) diagramma di struttura e di taglio dei cristalli di anfibolo; rottura preferenziale lungo i piani (110) e (110) e parallelamente all'asse c a produrre cristalli aciculari, tratto da: (Zoltai, 1979).

2.1 REVISIONE DELLA LETTERATURA DISPONIBILE SULLA TREMOLITE

Come anticipato al Paragrafo 1.2.2, i fattori che definiscono la natura pericolosa di amianto sono:

- forma e dimensione;
- la biopersistenza, dipendente da "clearance" e ritenzione;
- la composizione chimica-mineralogica.

Nei minerali appartenenti al gruppo degli anfiboli, di cui fa parte la tremolite, questi fattori possono subire delle variazioni legate all'abito cristallino che il minerale assume durante il processo di crescita e formazione.

La *forma* e la *dimensione*, congiuntamente al rapporto dimensionale tra lunghezza e diametro, concorrono a definire le capacità della fibra di giungere negli spazi alveolari. Si osserva quindi che un maggior rapporto di allungamento delle particelle può favorire l'allineamento della fibra con il flusso d'aria in ingresso durante l'atto respiratorio. Pertanto, le fibre che possiedono caratteristiche tali da penetrare in profondità, possono depositarsi sull'epitelio alveolare; segue, quando possibile, la rimozione della fibra attraverso il processo di fagocitosi operato dai macrofagi alveolari (Ministero della Salute, s.d.).

L'efficacia del processo di rimozione, mostrata con maggior dettaglio in **Figura 2.4**, è prevalentemente influenzata dalla dimensione della fibra. Per un minerale anfibolico anche dall'abito cristallino.

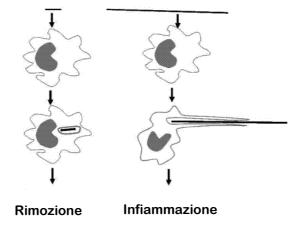


Figura 2.4 - L'influenza della dimensione della fibra sul macrofago, tratta da: (Petrus, 2012).

Si riscontra che per un *anfibolo asbestiforme* caratterizzato da fibre lunghe e sottili, il processo di rimozione operato dai macrofagi risulta difficile a causa della lunghezza e della persistenza delle fibre, destinata a produrre effetti biologici avversi. Le fibre d'amianto, infatti, molto più forti e flessibili rispetto ai frammenti di clivaggio, tendono a subire piegamenti senza rotture; se risultano troppo lunghe per essere fagocitate, si ha una ripercussione diretta sul macrofago attraverso: "una fagocitosi frustrata" con conseguente danneggiamento della membrana citoplasmatica del macrofago (**Figura 2.5**); una condizione di ingestione e re-ingestione e lo sviluppo di un conseguente processo di infiammazione con danneggiamento delle cellule epiteliali" (Ministero della Salute, s.d.). La cellula quindi morirà nel tentativo di rimuoverle e la fibra risulterà immersa in un deposito di glicoproteina/emosiderina formando un cosiddetto "corpo d'amianto" (Ilgren & Penna, 2004).

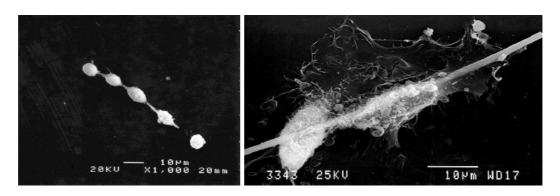


Figura 2.5 - Fagocitosi frustrata e danneggiamento della membrana del macrofago, tratta da: (Fubini, s.d.).

Al contrario, per gli anfiboli non asbestiformi, i frammenti lunghi e spessi possiedono caratteristiche di debolezza e fragilità. Perciò stress fisici, come la semplice espansione/contrazione alveolare, possono imporre una flessione del frammento che porta alla sua rottura. Questo processo può verificarsi anche nel momento in cui le componenti vengono respirate o durante la stessa attività muscolare, successiva al processo di fagocitosi, insita nel citoscheletro del macrofago (Ilgren & Penna, 2004).

La *biopersistenza* è una caratteristica insita delle fibre ed è associata alle proprietà che esse posseggono nel rimanere in una condizione inalterata in seguito alla deposizione sull'epitelio polmonare. È uno dei fattori più importanti ad incidere sulla cancerogenicità del minerale d'amianto ed è strettamente legata all'azione di protezione condotta dai

macrofagi. Come definito quindi dall'Arpa Emilia Romagna (2007), "la biopersistenza deriva da processi fisiologici di depurazione (traslocazione meccanica o rimozione) e processi di tipo fisico chimico (dissoluzione chimica, lisciviazione, rottura)". I macrofagi possono intervenire direttamente sull'eliminazione delle fibre, ma l'efficacia della loro azione dipende in particolar modo dalla lunghezza e/o dalla dissolvenza delle "particelle".

Aver chiarito inizialmente la natura delle superfici che si generano in un anfibolo con abito asbestiforme e non asbestiforme, a seguito di un eventuale comminuzione, permette di introdurre il processo di dissoluzione indotto dai microfagi. Nei frammenti di clivaggio caratterizzati da superfici con un maggior numero di difetti superficiali, l'azione di dissoluzione risulta essere efficace e massima; al contrario, nelle fibre d'amianto, la presenza di superfici lisce e largamente prive di difetti comporta una maggiore resistenza all'attacco acido. Questa situazione rende i frammenti non asbestiformi più suscettibili all'attacco dei macrofagi rispetto a fibre d'amianto della stessa larghezza (Ilgren & Penna, 2004).

Gli ultimi fattori di *composizione chimica* e *reattività superficiale* della fibra, secondo il Ministero della Salute (s.d.), influenzano "il trasferimento delle fibre nei diversi compartimenti biologici, l'attivazione delle cellule dei microfagi e la fagocitosi". Infatti, è proprio la caratteristica della fibra ad influenzarne la potenziale tossicità.

Gli studi nati con lo scopo di distinguere gli effetti cancerogeni di questi due tipologie di abiti della tremolite, sono stati condotti sia su animali (ratti), sia sull'uomo attraverso esami diretti. A tal scopo è necessario conoscere la cosiddetta "lunghezza critica" della fibra in relazione al soggetto coinvolto nello studio. Essa si trova infatti in funzione del diametro dei macrofagi alveolari e all'abilità che essi sviluppano nella rimozione delle fibre. Nell'uomo, il processo di rimozione è migliore in confronto a quello che si verifica nel roditore poiché i macrofagi alveolari umani sono in numerosità maggiore ed operano su una superficie molto più vasta (Valberg & Blanchard, 1991).

Gli esami condotti sull'uomo da Gamble & Gibbs (2008), più precisamente studi sugli effetti dei lavoratori esposti ad anfiboli non asbestiformi, furono realizzati con lo scopo di valutare se i frammenti di clivaggio dell'anfibolo potessero generare lo stesso rischio di cancro al polmone e mesotelioma dei lavoratori esposti ad anfiboli asbestiformi. L'osservazione condotta da Gamble & Gibbs (2008) su tre gruppi di lavoratori esposti ad anfiboli non asbestiformi (due gruppi a grunerite ed uno a talco industriale, contenente

tremolite ed antofillite) permise di stabilire che la presenza di tale anfibolo non aumentava il rischio di cancro ai polmoni o di mesotelioma.

Un'ulteriore valutazione degli effetti cancerogeni che la tremolite asbestiforme e non asbestiforme può sviluppare, è stata effettuata attraverso test *in vitro* o *in vivo*, con risultati più convincenti ottenuti da esperimenti diretti sugli animali. L'obiettivo di tali sperimentazioni è quindi quello di evidenziare la differenza di cancerogenicità, o più specificamente il potenziale d'induzione di mesotelioma, tra la tremolite riscontrata come frammento di clivaggio o in fibra.

Vengono mostrati in seguito gli esperimenti condotti ed i risultati ottenuti da differenti autori attraverso studi *in vitro* e *in vivo* (test di inalazione, iniezione ed impianto su animali).

Studi in vitro

Gli studi condotti da Timbrell et al. (1971) e Wylie & Mossman (1997) sulla tremolite non asbestiforme, mostrano che i frammenti di clivaggio sono biologicamente meno attivi rispetto agli anfiboli asbestiformi.

Ulteriori test *in vitro* condotti da Wagner et al. (1982) su tre campioni di fibre di tremolite (vedasi **Tabella 2.2**) prevedevano:

- I) lo studio del rilascio enzimatico da macrofagi peritoneali di topo;
- II) la formazione di cellule giganti in colture A549⁷;
- III) lo studio della citotossicità⁸ per cellule V79-4.

Da questi studi risultò che il campione C, avente fibre più lunghe rispetto ad A e B, fosse l'unico a produrre mesoteliomi. Questo risultato fu evidenziato da uno scarso effetto dei campioni A e B sulle cellule (II), mentre il campione C indusse sia il rilascio enzimatico (I) di LDH e BGL, da microfagi peritoneali di topo, che la formazione di cellule giganti nelle colture cellulari A549 (II). L'esito dell'ultimo test (III) mostrò l'assenza di citotossicità per il campione A, modesta per il campione B ed elevata per C.

_

⁷ Le cellule A549 sono cellule adenocarcinomiche umane alveolari lamino-epiteliali.

⁸ Insieme di attività biologiche che portano all'alterazione o morte delle cellule del sistema immunitario in seguito all'esposizione ad amianto.

Tabella 2.2 - Numero di particelle (µg) di tremolite usati da Wagner et al. (1982).

Campioni	n. di particelle non fibrose (×10 ⁴)	n. di fibre (×10 ⁴)	n. di fibre con lunghezza > 8 μ m (×10 ³) e diametro < 1,5 μ m	Provenienza
A	6,9	5,1	1,7	California – deposito di talco
В	20,7	4,8	0	Groenlandia – minerale prismatico
C	3,3	15,5	56,1	Corea del Sud – minerale fibroso si prevalenza fine

> Studi in vivo

Gli studi sperimentali *in vivo* (su animali) garantiscono risultati più approfonditi sulla variazione di cancerogenicità delle polveri derivanti da tremolite prismatica (o non asbestiforme) e tremolite asbestiforme. In **Tabella 2.3** sono riassunte le sperimentazioni di maggior rilievo, distinte tra tecniche di studio per: inalazione, iniezione o impianto.

• Esperimenti di inalazione

La sola ed unica sperimentazione realizzata attraverso l'inalazione di tremolite su animali (ratti) è stata condotta da Davis et al. (1985). Questa prevedeva l'esposizione del ratto per dodici mesi ad una concentrazione di tremolite di 10 mg/m³ (1600 f/ml), proveniente da estrazioni in Corea del Sud. Sono stati così riscontrati alti livelli di fibrosi polmonare, sedici casi di carcinoma e due mesoteliomi. La stessa tipologia di amianto, avente diametro inferiore a 0,5 μm e lunghezza inferiore a 5 μm, è stata adoperata dallo stesso Davis (1991) su sperimentazione con iniezione intraperitoneale.

Esperimenti di iniezione ed impianto

Tutti questi studi sono stati condotti attraverso iniezione intrapleurica, impianto intrapleurico o iniezione intraperitoneale. Per ogni studio sono state introdotte dosi massicce di tremolite direttamente nel mesotelio e sono state realizzate attraverso metodi di esposizione artificiale che bypassano i classici meccanismi di difesa dell'ospite. Tali esperimenti mostrano che i frammenti di clivaggio non riescono a produrre alcun tumore o risposta tumorale, a differenza degli alti tassi prodotti dalle fibre d'amianto. I risultati negativi forniscono quindi una prova evidente di non cancerogenicità degli anfiboli non asbestiformi per l'uomo. Gli studi di maggior rilievo vengono presentati in **Tabella 2.3**.

Tabella 2.3 - Studi in vivo.

Autori	Inalazione/Iniezione/Impianto	Materiale dose e procedure operative	Risultati
(Wagner, et al., 1960)	Iniezione intrapleurica in ratti SPF Sprague-Dawley e Wistar.	Studio condotto sulle tremoliti di Tabella 1.3.2 . L'iniezione fu somministrata a ratti di 8-10 settimane. Furono stimati tempi di sopravvivenza di 644 (campione A),549 (campione B) e 557 giorni (campione C).	I risultati subirono delle alterazioni causate dal basso tasso di sopravvivenza. Tuttavia ne risultò lo sviluppo di mesoteliomi sul 30% della popolazione trattata con tremolite prevalentemente fibrosa (campione C). Gli altri due campioni di tremolite non asbestiformi (campione A e B) non comportarono lo sviluppo di tumori.
(Smith, et al., 1979)	Iniezioni intrapleuriche in criceti.	Studio condotto su tremoliti, di cui: due asbestiformi (al 90 e 95%) e tre talco tremolitiche (due al 50 e 95% non asbestiformi; una tremolite al 90% con probabilità asbestiforme). Dosi di 10 e 25 mg. Al 600esimo giorno dall'iniezione gli animali furono sottoposti ad autopsia.	Nei criceti in cui fu iniettata tremolite asbestiforme si evidenziarono elevati livelli di fibrosi e mesoteliomi, rispetto a quelli descritti come tremolite o talco tremolite. La maggior parte dei tumori furono diagnosticati come mesoteliomi.
(Stanton, et al., 1981)	Impianto su superficie pleurica sinistra di ratti Osborne-Mendel.	Studio distinto da settanta esperimenti su differenti tipologie di tremolite. Dosi di 40 mg in gelatina ⁹ indurita sulla superficie pleurica sinistra.	Due tremoliti asbestiformi produssero in 21 ratti su 28 la generazione di mesotelioma, quindi con una probabilità tumorale del 100%. Esperimenti incerti, mostrarono la possibilità di sviluppo del tumore su

.

⁹ La tecnica a "gelatina indurita" permette di mantenere le fibre a contatto il tessuto (pleura).

			materiali non costituiti da fibre a dimensione critica (per Stanton lunghezza $> 8~\mu m$ e diametro $< 0.25~\mu m$) e viceversa. Problema attribuito ad eventuale aggregazione e frammentazione delle fibre.
(Davis, et al., 1985)	Inalazione in ratti SPF Wistar.	Studio condotto con un'esposizione di dodici mesi a tremolite asbestiforme in concentrazioni a 10 mg/m³	I risultati mostrarono alti livelli di fibrosi polmonare, 16 casi di carcinoma e 2 di mesotelioma.
(Davis, et al., 1991)	Iniezione intraperitoneale in ratti maschi SPF Wistar.	Studio condotto su sei campioni di tremolite; tre asbestiformi e tre non. Dosi di 10 mg. È stato permesso al ratto di vivere per l'intera durata di vita o finché mostrassero segni di docilità o formazione di tumore.	L'obiettivo fu quello di definire il tempo di sopravvivenza di ciascun ratto al mesotelioma e sviluppare così, su base statistica, una correlazione tra il tempo di sopravvivenza e la dose somministrata. Risultò che: (1) tutti i campioni sembravano possedere capacità di sviluppare mesotelioma con iniezione intraperitoneale e (2) il numero delle fibre non era sufficiente a definire le differenze in risposta.

3 MATERIALI, ATTREZZATURE E METODOLOGIA D'ANALISI

3.1 MATERIALI

Nel presente lavoro di tesi sono stati analizzati campioni di tremolite presso il Laboratorio Analisi Amianto "LAA" del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino.

I quattro campioni di tremolite oggetto di analisi nel presente elaborato provengono da località di prelievo differenti (vedasi **Tabella 3.1**) e possiedono caratteristiche alla microscala distinte in termini di morfologia e dimensione delle "fibre" (lunghezza, diametro e rapporto lunghezza/diametro). Queste proprietà saranno analizzate per ciascun campione al "Capitolo 4 – Risultati".

Tabella 3.1 - Campioni di tremolite e provenienza.

Nome del campione	Provenienza
Bracchiello	Bracchiello frazione del comune di Ceres (TO)
Monastero	Comune di Monastero di Lanzo (TO)
Verrayes	Comune di Verrayes (AO)
Caprie	Comune di Caprie (TO)

Si è collocato il campione su una superficie "nera" provvista di scala graduata millimetrica, con lo scopo di esaltare il contrasto e comprendere le reali dimensioni delle fibre. Si riportano in seguito le tabelle riassuntive delle caratteristiche di ciascun materiale analizzato, illustrate inoltre con l'immagine di come esso si presenta al suo stato originario.

Per il campione Monastero si riportano ulteriori immagini in **Allegato II** con aggiunta di quelle realizzate al macroscopio (modello *Wild Leica M420* della Wild Heerbrugg; vedasi Paragrafo 3.3.4.1). Le immagini mostrano la componente aggregata del campione ed esaltano la visione delle inclusioni di roccia. Ciò consente di giustificare il risultato ottenuto dalla macinazione e riportato nel "Paragrafo 4.4.2 – Monastero Macinato".

BRACCHIELLO

Caratteristiche:

Aspetto:

Il campione
'Bracchiello' presenta
delle fibre di lunghezza
variabile (tra circa 10 1 mm), rettilinee e
rigide (non flessibili).
Le fibre appaiono
traslucide, di aspetto
disperso e non
accorpato (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Campione Bracchiello.

CAPRIE

Caratteristiche:

Aspetto:

Il campione 'Caprie' presenta delle fibre di lunghezza variabile (da circa 10 mm a < 1 mm), rettilinee, rigide, prismatiche e con aspetto disperso e non accorpato (Figura 3.2). Le fibre appaiono traslucide; è possibile osservare componenti di estrema finezza.

A causa della presenza di notevoli quantità di componenti fini, il recupero è risultato difficoltoso.

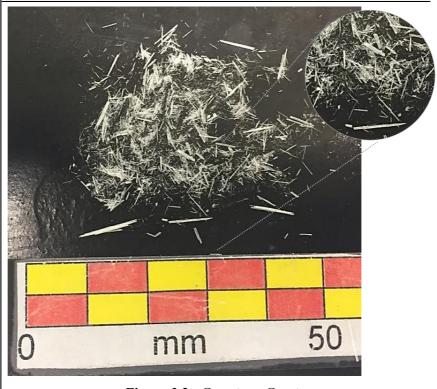


Figura 3.2 - Campione Caprie.

VERRAYES

Caratteristiche:

Il campione 'Verrayes' presenta un aspetto in termini di lunghezze e spessori molto variabili. Si osservano delle fibre rigide, rettilinee e frammenti prismatici (Figura 3.3a); sono evidenti anche componenti più fini, di lunghezza ridotta, disperse o aggregate tra di loro in piccoli accumuli (Figura 3.3b).

A causa della presenza di notevoli quantità di componenti fini, il recupero è risultato difficoltoso.

Aspetto:

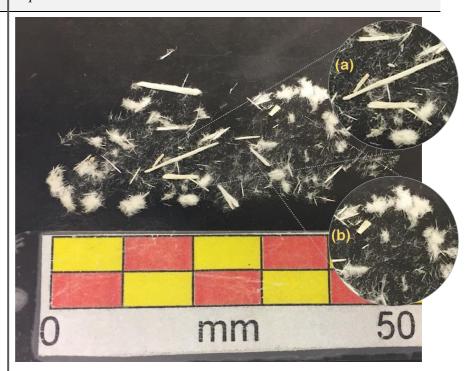


Figura 3.3 - Campione Verrayes; (a) componenti prismatiche e (b) componenti fini disperse o aggregate.

MONASTERO

Caratteristiche:

Il campione 'Monastero' presenta fasci caratterizzati dall'accorpamento di più fibre. A differenza degli altri campioni l'aspetto è prevalentemente fibroso; le fibre appaiono apparentemente flessibili (Figura 3.4a) e i fasci sfilacciati alle estremità (Figura 3.4b). Eventuali variazioni di colore nelle fibre derivano dalla presenza di inclusioni di roccia mostrate in visione macroscopica in Allegato II.

Aspetto:

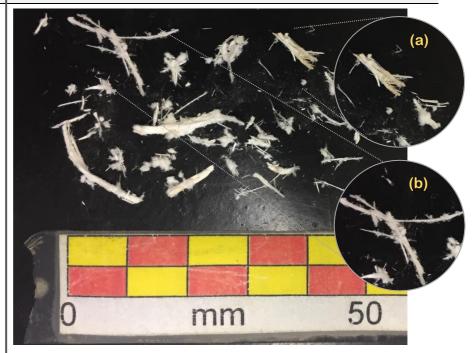


Figura 3.4 - Campione Monastero: (a) componenti flessibili e (b) fascio con estremità aperte

Tra i materiali si riportano inoltre i liquidi (oli) ad indice di rifrazione noto (**Figura 3.5**) della *Cargille Laboratories, Inc.* Questi vengono adoperati nello studio in microscopia ottica a contrasto di fase, principalmente per l'identificazione del minerale d'amianto e nel rilevamento degli aspetti morfologici e dimensionali delle fibre.



Figura 3.5 - Olio ad indice di rifrazione noto della Cargille Laboratories Inc.

3.1.1 Inquadramento geologico dei campioni

I campioni Bracchiello, Monastero e Caprie provengono dal settore nord occidentale del territorio piemontese della provincia di Torino. Più precisamente le zone di Bracchiello e Monastero ricadono nelle Valli di Lanzo, mentre Caprie appartiene alla Val di Susa. Il campione Verrayes invece proviene dal settore centrale orientale della Regione Autonoma della Valle d'Aosta.

Dal documento "Amianto naturale in Piemonte" (Arpa Piemonte, 2008) risulta che la zona di Bracchiello e Monastero di Lanzo fossero in passato aree di ricerca ed estrazione strettamente incentrate sul talco e amianto, minerali in associazione con complessi ofiolitici ("Pietre Verdi"). Questo settore delle Valli di Lanzo (Bracchiello e Monastero di Lanzo) è prevalentemente composto da unità di crosta oceanica conformanti la Zona Piemontese e da altri litotipi appartenenti alla Zona Sesia-Lanzo.

Come ne risulta quindi dall'osservazione del Foglio n. 55 "Susa" dalla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000, con particolare della zona di Bracchiello e Monastero di Lanzo estrapolato in **Figura 3.6** e per Caprie seguente in **Figura 3.7**, la legenda (**Figura 3.9**) mostra come nelle Valli di Lanzo siano particolarmente prevalenti rocce di tipo ofiolitico (prasiniti, anfiboliti, serpentine e serpentinoscisti) e rocce appartenenti al periodo del Triassico e Giurassico (calcescisti e filladi; gneiss minuti e micascisti). Le stesse formazioni sono presenti lungo lo sviluppo della Val di Susa con ulteriore presenza di gneiss appartenenti al periodo del Pretriassico e morene del Quaternario. L'articolo di Gattiglio e Sacchi (2006) evidenzia aspetti geologici della Val di Susa, tra cui la prevalente localizzazione degli anfiboli in giunti, piani di taglio ed in corrispondenza di masse ofiolitiche affioranti dal settore di Condove-Caprie.

Per quanto concerne invece la zona di Verrayes, dall'osservazione del Foglio n. 28 "Aosta" dalla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000, con particolare di Verrayes mostrato in **Figura 3.8**, si evidenzia la presenza di gneiss, marmi e rare peridotiti. Infatti, è proprio lungo lo sviluppo centrale ed orientale del territorio valdostano (principalmente Verrayes, Châtillon, e Montjovet) che si evidenzia la presenza di calcescisti e pietre verdi (serpentiniti, prasiniti, metagabbri ed anfiboliti), situazione dettata dall'affioramento della Zona Piemontese (Arpa Valle d'Aosta, s.d.).

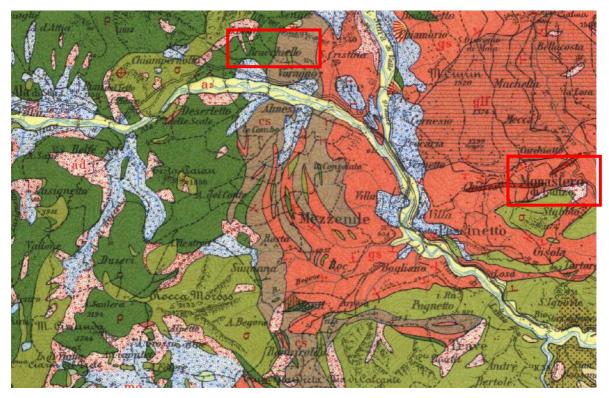


Figura 3.6 - Identificativo geologico di Bracchiello e Monastero di Lanzo al Foglio n.55 "Susa" tratto da (I.G.M, 1959).

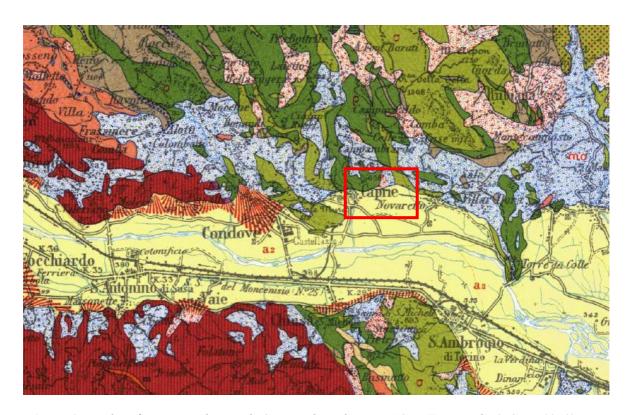


Figura 3.7 - Identificativo geologico di Caprie al Foglio n.55 "Susa" tratto da (I.G.M, 1959).

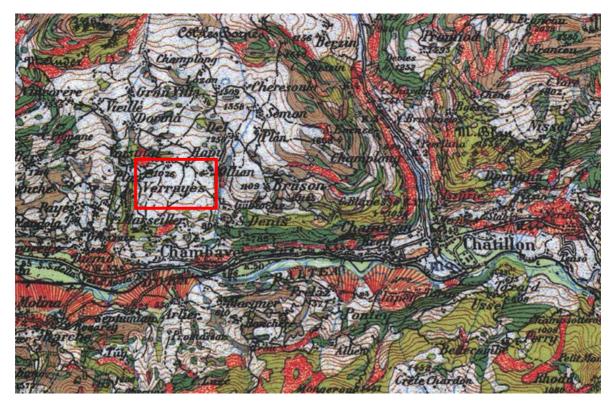


Figura 3.8 - Identificativo geologico di Verrayes al Foglio n.22 "Aosta" tratto da (I.G.M, 1959).

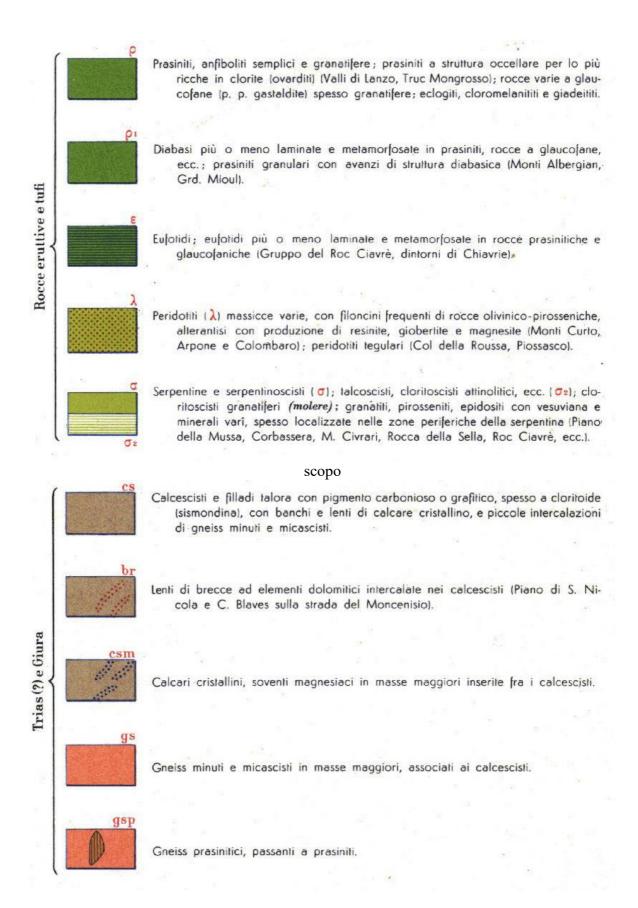


Figura 3.9 - Porzione di legenda (caratteristica per Figura 3.6, Figura 3.7 e Figura 3.8): tratto da (I.G.M, 1959).

3.2 PROCEDURE DI SICUREZZA

Le procedure di sicurezza previste per il Laboratorio Analisi Amianto ed adoperate durante l'analisi dei campioni di tremolite, prevedono l'utilizzo di dispositivi di protezione idonei a garantire la sicurezza e la non inalabilità dei materiali (vedasi Paragrafo 3.3.1). Lo scopo è quello di specificare istruzioni per un corretto maneggiamento di campioni contenenti minerali d'amianto e garantire una corretta pulizia di superfici ed attrezzature, evitandone così contaminazioni dell'ambiente di lavoro e tra gli stessi campioni.

Ciascun campione è stato analizzato singolarmente, indossando dispositivi idonei a garantire la protezione dell'operatore (camice, guanti e mascherina tipo FFP3). Le fasi che prevedono azioni di maneggiamento del campione, come l'acquisizione fotografica, l'introduzione ed estrazione del preparato dal molino (processo di comminuzione) e la preparazione dei campioni per l'osservazione a microscopio, si sono realizzate sotto cappa aspirante (modello *Black Activa Plus* dell'AQUARIA srl; vedasi Paragrafo 3.3.1.1). Al termine di ciascuna azione, le attrezzature adoperate e le superfici sono state accuratamente pulite: dapprima mediante aspirazione (aspirapolvere modello *Numatic*) delle eventuali fibre rimanenti e successivamente con carta assorbente inumidita (in seguito smaltita nell'apposito cestino).

L'azione di comminuzione dell'amianto, condotta a perseguire l'obiettivo della tesi, comporta l'ottenimento di un prodotto ad elevata finezza. Al termine dell'operazione si prevede quindi un recupero del campione avvalendosi dell'utilizzo di un pennello, atto a consentire la rimozione delle eventuali fibre rimaste adese alle pareti del sistema di macinazione (giara). Si procede in seguito con: l'aspirazione del piano di lavoro, del pennello e della giara; della pulizia del piano con carta assorbente inumidita; introduzione di acqua nella giara mediante spruzzetta e trasferimento della medesima nel lavandino per lavaggio sotto acqua corrente.

3.3 ATTREZZATURE

Nel seguente paragrafo si identificano le principali attrezzature adoperate nello svolgimento di questo studio.

3.3.1 Attrezzature protettive

Si elencano le attrezzature accessibili nel Laboratorio Analisi Amianto, finalizzate a garantire la protezione dell'operatore e dell'ambiente circostante da eventuali contaminazioni di provenienza dell'area di lavoro.

3.3.1.1 Cappa aspirante

Il Laboratorio Analisi Amianto è provvisto di cappa aspirante 'Black Activa Plus' (linea Blue Air) dell'AQUARIA srl (Figura 3.10) costituita da:

- un pannello frontale in vetro temperato;
- un piano di lavoro in gres;
- un doppio fondale di aspirazione posteriore in acciaio, ad uniformare il flusso orizzontale aspirante;
- un quadro di comando, per il controllo del sistema di illuminazione e di regolazione della velocità di aspirazione dei motoventilatori;
- un sistema di allarmi acustici e visivi in caso di velocità aspiranti insufficienti,
 intasamento dei prefiltri e necessità di sostituzione dei filtri;
- prefiltri e filtri (2 a carbone attivo più 1 in HEPA).

Prima di iniziare qualsiasi attività che preveda l'apertura del contenitore contenente il campione, si richiede l'accensione della cappa aspirante ed è necessario che si provveda a riporci sotto tutte le attrezzature necessarie per lo svolgimento del lavoro; si evitano così eventuali contaminazioni dell'ambiente. Le attrezzature principali vengono mostrate in **Figura 3.10**.

.



Figura 3.10 - Cappa aspirante del Laboratorio Amianto provvista di: (a) bilancia di precisione; (b) fogli di carta - piano di appoggio per vetrini; (c) carta assorbente; (d) bottiglia a spruzzetta contenente acqua; (e) cestino con sacchetto impermeabile per la raccolta dei piccoli rifiuti contenenti amianto; (f) macroscopio. Tratta da: (Marini, 2015).

3.3.1.2 Contenitori per la conservazione dei campioni

I campioni vengono conservati in appositi barattoli, eventualmente riposti in un sacchetto di plastica sigillato (**Figura 3.11**).



Figura 3.11 - Contenitore dei campioni di tremolite.

3.3.1.3 Dispositivi di protezione individuale

I dispositivi di protezione individuale (DPI) indossati per garantire la protezione dell'operatore durante la permanenza nel laboratorio consistono in:

- camice;
- guanti monouso in nitrile;
- protezioni delle vie respiratorie con mascherine della topologia a *facciale filtrante FFP3* (classe di efficienza filtrante alta).

3.3.2 Attrezzature per la preparazione del campione

Vengono mostrate le procedure, con annesse attrezzature, necessarie alla preparazione dei campioni da sottoporre ad osservazione ed analisi con microscopio ottico a contrasto di fase (MOCF) e microscopio elettronico a scansione (SEM).

3.3.2.1 Bilancia di precisione

La bilancia di precisione, del tipo SALTER AND (**Figura 3.12**), è dotata di tre aperture le quali consentono di collocare la massa da pesare sull'apposito piattino ed isolarla dall'ambiente esterno, evitandone quindi eventuali fluttuazioni del peso causati da fattori esterni.



Figura 3.12 - Bilancia di precisione SALTER AND.

3.3.2.2 Preparazione dei vetrini per MOCF

Nella preparazione dei vetrini da sottoporre ad indagine con microscopio ottico a contrasto di fase (MOCF) vengono impiegate le seguenti attrezzature:

- Bilancia di precisione;
- Vetrino portaoggetti;
- Vetrino coprioggetti;
- Scatolina porta vetrini coprioggetto;
- Olii ad indice di rifrazione noto;
- Pipetta Pasteur (contagocce);
- Bisturi o pinzetta;
- Bacchetta di vetro a punta tonda e liscia;
- Carta assorbente.

L'allestimento del preparato sul vetrino si realizza secondo la seguente procedura:

- 1. Pulizia del vetrino portaoggetto e coprioggetto per eliminare l'eventuale sporcizia o granelli di polvere che possono alterarne l'immagine osservata; la pulizia viene effettuata mediante l'utilizzo di un foglio di carta assorbente inumidito con acetone. Al termine di questa fase e in attesa della successiva, il vetrino portaoggetti viene posizionato sopra un foglio di carta e il coprioggetti viene riposto nell'apposita scatolina (**Figura 3.13**);
- 2. Posizionamento del vetrino portaoggetti sulla bilancia di precisione, chiusura delle aperture e detrazione della tara;
- 3. Prelievo di una piccola frazione di campione, con l'aiuto di pinzette o bisturi, e successivo posizionamento al centro del vetrino portaoggetti; susseguente pesatura del campione (effettuato il prelievo della quantità necessaria occorre chiudere e sigillare il contenitore contenente il campione);
- 4. Prelievo dalla bilancia del vetrino e deposizione di una o due gocce di olio in corrispondenza del punto in cui è stato posizionato il campione, con l'ausilio di un contagocce (mantenere la distanza tra il contagocce e la superficie del vetrino per evitare contaminazioni dell'olio);
- 5. Miscelazione e spargimento del preparato (campione e olio) con l'impiego di una bacchetta in vetro nei limiti di una superficie poco più piccola di quella del

- coprioggetto; questa azione consente la dispersione ottimale delle fibre nella superficie da osservare;
- 6. Posizionamento del vetrino coprioggetto. Questo vetrino è molto più piccolo e sottile rispetto al portaoggetti; durante la posa si potrebbero verificare alcuni inconvenienti come: la formazione di bolle d'aria, la deposizione di una goccia di olio troppo grande (in questo caso l'eccesso deborderà dal coprioggetti e sarà necessario eliminarlo appoggiando della carta assorbente ai lati del vetrino) o la deposizione di una goccia troppo piccola (in questo caso si dovrà intervenire con l'aggiunta di liquido direttamente dai bordi del vetrino coprioggetto con l'ausilio della pipetta Pasteur) (Figura 3.14).
- 7. Identificazione del vetrino scrivendone sulla sua porzione laterale il nome del campione, l'olio in cui è stato immerso ed eventualmente altre informazioni (ad esempio: la distinzione tra campione iniziale/macinato o il peso); collocazione in una scatolina per il trasporto, mostrata in **Figura 3.15**.

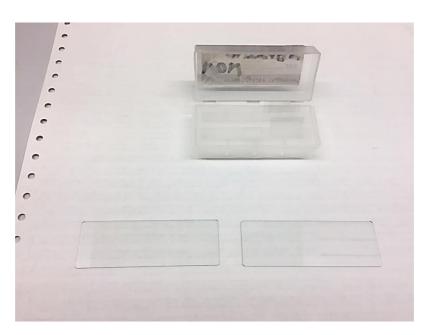


Figura 3.13 - Disposizione dei vetrini a seguito della fase preliminare di pulizia: in alto la scatolina contenente i vetrini coprioggetto e in basso i vetrini portaoggetto.

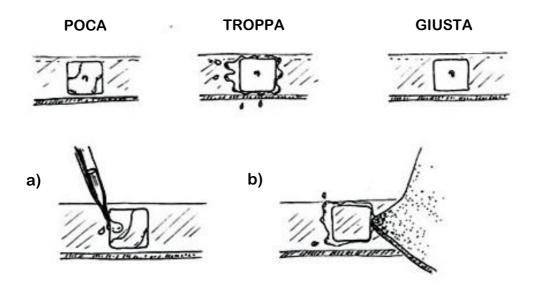


Figura 3.14 - Inconvenienti nella posa del coprioggetto associati alla deposizione delle gocce di olio: (a) Aggiunta e (b) rimozione del liquido, tratto da: (<<u>Amici del Microscopio</u>>)



Figura 3.15 - Preparati microscopici con identificazione dei campioni.

3.3.2.3 Preparazione degli stub per SEM

Nella preparazione dei campioni da sottoporre ad indagine con microscopio elettronico a scansione (SEM) si prevede che il campione venga montato su un supporto costituito da una basetta metallica (solitamente di alluminio) dotata di un perno di bloccaggio, denominata "stub" (particolare in **Figura 3.16**). L'adesione del campione avviene attraverso una superficie conduttiva di carbonio (biadesiva) o a pasta collante a base di grafite o argento.

La preparazione dello stub si realizza secondo la seguente procedura:

- Identificazione sulla parte inferiore dello stub del nome del campione da analizzare;
- Estrazione di una piccola porzione di campione dall'apposito contenitore e successiva dispersione e omogeneizzazione in acqua;
- Filtrazione del preparato su filtro a membrana in policarbonato, con apposita apparecchiatura di filtrazione (vedasi **Figura 3.17**); prelievo del filtro mediante pinzetta e posizionamento nell'apposito contenitore;
- Applicazione dello scotch biadesivo di carbonio allo stub e rimozione della protezione cartacea posta sulla superficie biadesiva;
- Montaggio del filtro sullo stub: il filtro viene prelevato, afferrandolo lungo il
 bordo più esterno (dove non c'è polvere depositata), una porzione viene
 tagliata e posizionata sul nastro adesivo in policarbonato precedentemente
 disposto sullo stub. Lo stub viene collocato in un contenitore idoneo a
 mantenerlo protetto dalla polvere (Figura 3.18a); (in Figura 3.18b viene
 mostrato uno stub realizzato attraverso la semplice procedura di adesione del
 campione direttamente sulla superficie biadesiva);
- "Doratura" con sputtering catodico.

La "doratura" è una fase prevista dagli standard di protocollo e consiste nella ricopertura dello stub con un sottile strato (circa 20 - 30 nm) di metallo conduttivo come oro, platino o di una lega oro-palladio. Come descritto da Bozzola & Russell (1999), la copertura metallica previene l'accumulo di cariche ad alta tensione sul campione, conducendole a terra, e contribuisce all'eliminazione del calore potenzialmente dannoso. Si può realizzare attraverso sputtering catodico o mediante evaporazione sotto vuoto.



Figura 3.16 - Particolare di stub usato per analisi SEM.

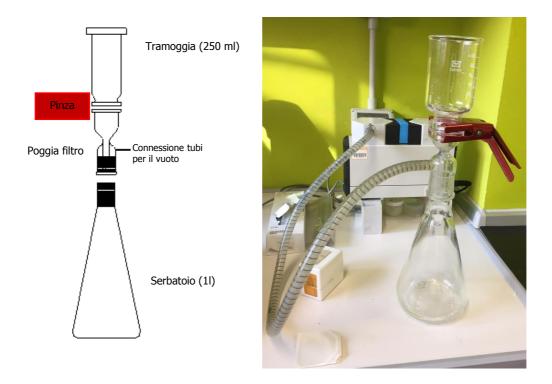


Figura 3.17 - Schema dell'attrezzatura per la filtrazione dei campioni su membrana.

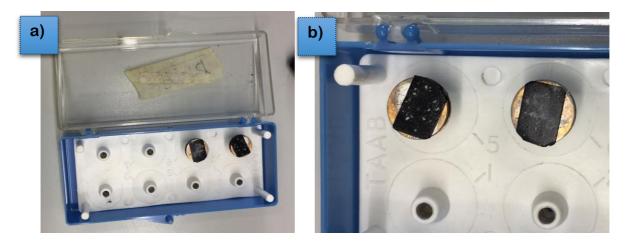


Figura 3.18 - Montaggio del filtro sullo stub: (a) contenitore per stub e (b) stub realizzati con adesione del campione su superficie biadesiva in carbonio.

3.3.3 Apparecchiatura per la comminuzione

Si presenta l'apparecchiatura adoperata nel condurre il processo di macinazione. Tale procedura consta in una delicata azione meccanica, basata principalmente su azioni di compressione ed abrasione del materiale.

3.3.3.1 Molino a masse eccentriche in agata

Il processo di macinazione si realizza con molino a masse eccentriche modello 954/2 della Humboldt-Wedag.

Il sistema si compone di una giara cilindrica in agata, all'interno della quale viene introdotto il materiale da macinare e, in seguito, il corpo macinante in agata (Figura 3.19). La giara viene chiusa con l'apposito coperchio a tenuta stagna ed eventualmente sigillata con nastro adesivo in prossimità della scanalatura giara-coperchio; si evita così la possibile fuoriuscita di particelle. Successivamente si fissa la giara al piatto vibrante del molino mediante un apposito meccanismo di bloccaggio (Figura 3.21), ed è proprio la vibrazione del piatto a garantire la movimentazione del cilindro in agata per un tempo definito (circa 1 minuto) e sufficiente a garantirne la macinazione.



Figura 3.19 - Giara e corpo macinante in agata.



Figura 3.20 - Vista interna della giara in agata con coperchio.



Figura 3.21 - Molino a masse eccentriche modello 954/2 della Humboldt-Wedag.

3.3.4 Strumentazione per l'analisi

Si elencano gli strumenti adoperati per l'osservazione macroscopica e microscopica dei campioni: il macroscopio (nella sola visione del campione iniziale *Monastero*), il microscopio a contrasto di fase (MOCF) e microscopio elettronico a scansione (SEM).

3.3.4.1 Macroscopio

Il macroscopio utilizzato per l'osservazione del campione originario *Monastero* è il modello *Wild Leica M420* della Wild Heerbrugg. Tale strumento è progettato per osservare e fotografare oggetti nella loro interezza, massimizzandone la qualità d'immagine.

Il macroscopio si compone di (Figura 3.22):

- Bioculari a regolazione diottrica;
- Video/Fototubo, collegato ad un terzo oculare ("oculare fotografico") e consente il montaggio di una vasta gamma di telecamere o fotocamere;
- Diaframma di apertura;
- Guida verticale per la messa a fuoco;
- Obiettivo macrozoom;
- Sorgente luminosa orientabile ad illuminare l'oggetto;

Negli oculari si produce un'immagine eretta (cioè non invertita).

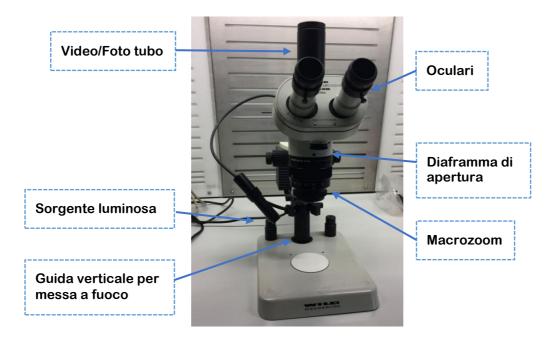


Figura 3.22 - Fotomacroscopio Wild Leica M420 della Wild Heerbrugg.

3.3.4.2 Microscopio ottico a contrasto di fase (MOCF)

Il microscopio ottico a contrasto di fase (MOCF) opera nel campo del visibile e si basa sul fenomeno dell'interferenza luminosa. Questo strumento consente di condurre l'analisi di tutti quei preparati che appaiono trasparenti, incolori e sottili, attraverso modalità di allestimento del campione su vetrino (descritto al Paragrafo 3.3.2.2).

Il microscopio a contrasto di fase adoperato nel Laboratorio Amianto è del tipo *LEICA DM LP* mostrato in **Figura 3.23**.

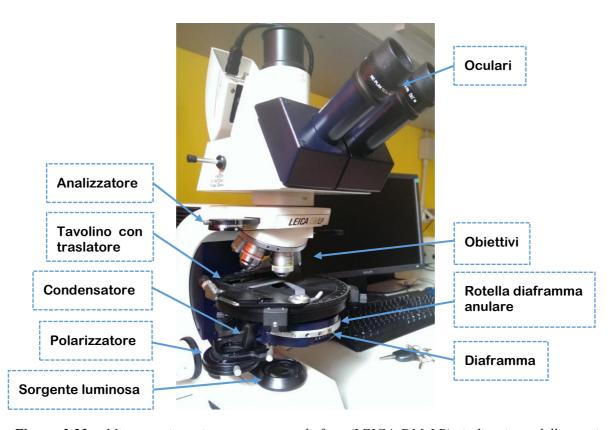


Figura 3.23 - Microscopio ottico a contrasto di fase (LEICA DM LP), indicazione delle parti costituenti. Tratto da (Marini, 2015)

È uno strumento che opera attraverso la combinazione tra due lenti: la 'lente obiettivo', posta dinanzi l'oggetto e abbastanza vicina al fuoco, e la 'lente oculare', posizionata a una distanza tale per cui il fuoco coincide con l'immagine dell'oggetto. L'immagine dell'oggetto creata così dalla prima lente diviene l'oggetto della seconda.

Gli obiettivi adoperati nel contrasto di fase presentano sul barilotto esterno le sigle di Ph, per il corretto posizionamento del diaframma anulare. Questi sono obiettivi particolari in quanto al loro interno è presente una lamina o anello di fase, posto nel fuoco posteriore all'obiettivo (**Figura 3.24**). Tuttavia possono essere utilizzati anche come normali obiettivi semplicemente togliendo il condensatore e l'anello di fase.

Il microscopio è dotato di un tavolino che consente l'appoggio del campione (vetrino). Durante l'osservazione del preparato, il vetrino può essere spostato in diverse posizioni tramite traslazioni, orizzontali e/o verticali, realizzate con un traslatore fisso al tavolino (l'immagine osservata ne risulta capovolta, perciò i movimenti del traslatore appaiono contrari). Questo piano di supporto è di forma circolare e può essere mantenuto fisso o può essere ruotato per orientare meglio il campione o per studi in luce polarizzata (Romano, 2016).

L'immagine viene messa a fuoco mediante lenti movimenti della vite micrometrica. Si parte inizialmente da osservazioni con un basso ingrandimento ed in seguito si procede, ruotando il portaobiettivi a revolver (con attenzione a non urtare il vetrino), adoperando obiettivi a potere d'ingrandimento maggiore; un maggior potere d'ingrandimento fornisce un campo d'osservazione più limitato.

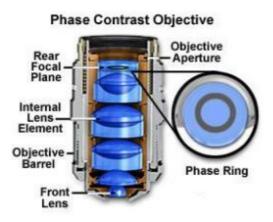


Figura 3.24 - Obiettivo per contrasto di fase, tratto da: (Romano, 2016).

Le parti principali costituenti il microscopio ottico a contrasto di fase sono:

- Analizzatore: filtro polarizzatore posto tra obiettivi e l'oculare;
- Condensatore: regolabile in altezza, è un sistema di lenti con la funzione di far convergere i raggi nell'obiettivo;
- Diaframma anulare: costituito da una slitta circolare, su cui sono inseriti dei fori per il passaggio della luce diretta oppure delle fasce anulari. È

riconoscibile dall'indicazione sulla corona delle sigle "Ph1", "Ph2" e "A⁻¹" (usate in funzione degli obiettivi);

- Diaframma: regola l'ampiezza del fascio di luce;
- Polarizzatore: filtro posto tra la sorgente luminosa e il tavolino portaoggetti.

L'analizzatore e il polarizzatore aggiungono la funzionalità in 'luce polarizzata' al microscopio, al fine di permettere l'identificazione di materiali birifrangenti. Il microscopio in uso permette l'osservazione: in luce diretta o parella, in luce polarizzata e in contrasto di fase.

Il microscopio ottico in contrasto di fase è uno strumento adoperato nella distinzione delle varie forme di amianto che, oltre a differenziarsi per la loro morfologia, si distinguono anche per l'angolo di estinzione e nei colori d'interferenza; proprietà riscontrabili in visione in luce polarizzata.

Si definisce quindi:

- l'angolo di estinzione: angolo con il quale le linee di sfaldatura della fibra, poste inizialmente parallele ad uno dei riferimenti del crocifilo, si estinguono durante la rotazione del piatto del microscopio o della rotella dell'analizzatore; la fibra presenterà estinzione retta, nel caso in cui si estingua parallelamente ai riferimenti del crocifilo, oppure estinzione obliqua;
- i colori di interferenza: dipendono dalle proprietà della fibra (in particolare dalla sua birifrangenza), ma anche dall'orientazione e dallo spessore del cristallo attraversato.

La dispersione cromatica è una tecnica adoperata nell'identificazione delle fibre di amianto, al MOCF con o senza luce polarizzata, ed implica una colorazione sia della particella sia dell'alone che la circonda (**Figura 3.25**). Questi effetti cromatici si creano quando l'oggetto viene immerso in liquidi aventi indice di rifrazione (n_l) vicino a quello del minerale (n_p), perciò $\Delta_{\perp} n = n_{\perp l} - n_{\perp p} \approx 0$ (compreso tra -0,020 e +0,020). Se l'indice di rifrazione del liquido è superiore a quello del solido ($n_l > n_p$) la fibra appare di color bianco e il fondo scuro, viceversa la fibra appare nera su sfondo chiaro (condizione di massimo contrasto).

Come si osserva nello studio condotto da Marconi (1982), finalizzato all'identificazione delle particelle fibrose di minerali d'amianto con la tecnica della

dispersione cromatica, sono utili liquidi con indice n pari a 1,550 per il crisotilo, 1,580 - 1,670 - 1,700.

La visione in luce polarizzata consente l'osservazione di ulteriori proprietà ottiche delle fibre di amianto, quali (Fun Science Gallery, s.d.):

- Pleocroismo: fenomeno ottico visibile con il solo polarizzatore che si manifesta come una variazione nel colore della fibra al variare dell'orientazione rispetto alla direzione di osservazione. Questo fenomeno è dovuto alla capacità del minerale di assorbire diverse lunghezze d'onda della luce trasmessa a seconda delle sue orientazioni cristalline;
- Segno dell'allungamento ottico: dovuto all'interazione tra l'onda (luce) e l'oggetto. Quando la luce incontra la fibra si verifica un cambiamento nella sua lunghezza d'onda e nella fase. A seconda della velocità di propagazione dell'onda nel materiale si avrà un allungamento positivo (o lunghezza lenta) o negativo (o lunghezza veloce).

Le proprietà precedentemente definite variano a seconda della tipologia di amianto e vengono riassunte in **Tabella 3.2**.

In questo lavoro di tesi i campioni analizzati sono costituiti da fibre di tremolite riconosciute a microscopio sia per la loro morfologia che per le proprietà della fibra acquisibili da una visione in luce polarizzata. Il conteggio e la misurazione delle fibre sono stati realizzati con metodo di osservazione in contrasto di fase, creando una condizione di massimo contrasto attraverso l'immersione del campione in un liquido avente un indice di rifrazione minore a quello della tremolite ($n_{tremolite} = 1,615$).

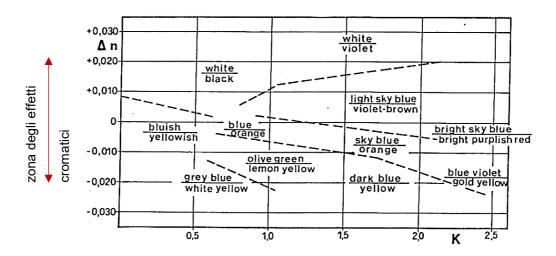


Figura 3.25 - Tabella degli effetti cromatici, tratto da: (Shmidt, 1985).

Tabella 3.2 - Parametri ottici dei minerali di amianto definibili con l'utilizzo di microscopia ottica polarizzata, tratta da: (Deer, et al., 1992).

PARAMET	RI OTTICI DE	I MINERALI I	DI AMIANTO d	efinibili tramite ı	microscopia o	ttica a luce pola	rizzata (Deer, et al., 1992)	Indice (n) olio
		Indici di rifrazione (n)			Tipo e			di riferimento per
Famiglia mineralogia	Specie mineralogica	n ⊥ asse della fibra	n // asse della fibra	Birifrangenza	angolo di estinzione	Segno di allungamento	Colore e paleocroismo	l'osservazione in contrasto di fase (MOCF)
Serpentino	Crisotilo	1.532-1.549	1.545-1.556	0.07-0.013	Retto	+	Incolore-beige non pleocroico	1.550
Anfiboli	Actinolite	1.617-1.658	1.641-1.677	0.019-0.024	Retto	+	Verde chiaro, pleocroico	1.640
	Amosite	1.664-1.686	1.680-1.698	0.014-0.022	Retto	+	Beige-bruno, non pleocroico	1.670
	Antofillite	1.596-1.654	1.625-1.667	0.016-0.024	Retto	+	Incolore-beige, non pleocroico	1.615÷1.620
	Crocidolite	1.668-1.717	1.662-1.701	0.006-0.016	Retto	-	Blu, pleocroico	1.700
	Tremolite	1.599-1.622	1.622-1.641	0.019-0.024	Obliquo	+	Incolore-grigio chiaro, non pleocroico	1.615

3.3.4.3 Microscopio elettronico a scansione (SEM)

Il microscopio elettronico a scansione (SEM) garantisce una visione ad ingrandimenti e risoluzione nettamente superiore al microscopio ottico. Questo strumento permette di condurre l'analisi dei preparati allestiti secondo le modalità descritte al Paragrafo 3.3.2.3.

Il microscopio elettronico a scansione adoperato al laboratorio di Arquata Scrivia è il *MIRA3 LMH* della casa produttrice TESCAN, mostrato in **Figura 3.26**.



Figura 3.26 - Microscopio elettronico a scansione MIRA3 LMH (TESCAN).

Il SEM non sfrutta una sorgente luminosa come nel caso della microscopia ottica, ma bensì un fascio di elettroni che colpiscono il campione. L'interazione fascio-campione consiste in una scansione in sequenza (riga per riga) di una piccola area rettangolare del campione e la conseguente generazione di diversi segnali (elettroni di backscattering, elettroni secondari, raggi X, etc.), che una volta acquisiti vengono elaborati al fine di ottenere un'immagine a scala di grigi. Il sistema opera in una condizione di alto vuoto.

Il microscopio elettronico a scansione possiede uno sviluppo prevalentemente verticale e i principali costituenti, mostrati in **Figura 3.28**, sono (Fioravanti , 2016):

- la sorgente di elettroni origine del fascio: se ne distinguono due tipologie: ad emissione termoionica o emissione di campo. Più frequente è la prima soluzione, costituita da un catodo a filamento metallico (tungsteno o esaboruro di lantanio) portato ad elevate temperature;
- le lenti elettromagnetiche: sistema caratterizzato da due lenti di condensazione
 e un 'obiettivo'; le prime due diminuiscono la dimensione del fascio (nel
 diametro) fino all'ordine dei nanometri, mentre l'ultima concorre a focalizzare
 il fascio sul campione, acquisendo informazioni sulla natura e sulle proprietà
 della superficie;
- le bobine di deflessione elettrostatica: consentono la deviazione delle traiettorie degli elettroni e la successiva scansione del fascio lungo la superficie del campione;
- la camera porta-campioni;
- i rivelatori di segnali: apparati dedicati alla captazione dei segnali di risposta emessi dal campione;
- un sistema di trasformazione del segnale in immagine.

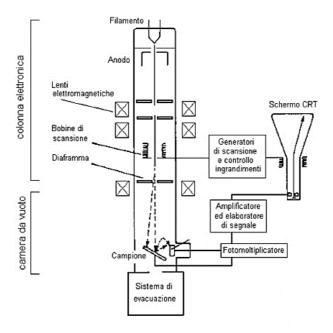


Figura 3.27 - Schema di elettronico a scansione (SEM), tratto da: (Bacaloni, 2013).

Durante il processo di interazione fascio-materia, gli elettroni collidono con la nuvola elettronica degli atomi costituenti la materia. Le collisioni possono verificarsi in condizioni elastiche a conservazione di energia e cambio di traiettoria o in condizione anelastiche con cessione di energia (Vittone, 2016). Quindi i segnali che vengono emessi dal campione in seguito all'interazione con il fascio, visibili in **Figura 3.28**, sono distinti in (Vittone, 2016):

- Elettroni retrodiffusi (o di backscattering): sono elettroni che vengono liberati attraverso collisioni elastiche tra gli elettroni primari appartenenti al fascio ed indirizzati contro il campione. Essi forniscono informazioni sulla composizione del campione;
- Elettroni secondari: sono elettroni appartenenti alle orbite esterne del campione (elettroni di valenza). Essendo debolmente legati vengono rilasciati verso l'esterno attraverso un urto anelastico condotto con un elettrone primario appartenente al fascio. Essi forniscono informazioni sulla morfologia del campione;
- Raggi X: sono raggi che vengono emessi a seguito di un particolare fenomeno;
 l'atomo colpito da un elettrone del fascio primario può perdere a sua volta un elettrone attraverso il fenomeno di ionizzazione dei gusci elettronici, tale per cui si crei una vacanza interna Successivamente gli elettroni appartenenti agli orbitali più esterni possono riempire la vacanza creatasi liberando energia sotto forma di raggi X;
- Elettroni Auger: sono emissioni a debole energia che si verificano a seguito del fenomeno associato all'emissione dei raggi X. In questo caso l'energia in eccesso posseduta dall'atomo può essere anche liberata attraverso l'emissione di un elettrone degli orbitali più esterni (elettrone Auger). Questi elettroni forniscono informazioni sulla composizione e sul legame chimico degli atomi.

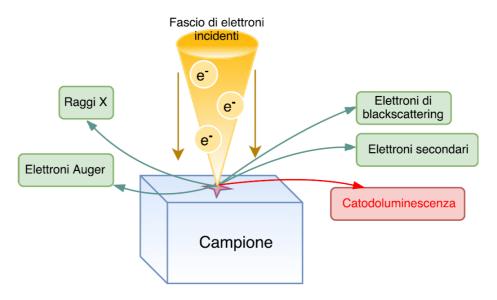


Figura 3.28 - SEM: interazione tra fascio di elettroni e il campione; in rosso il segnale dei fotoni e in verde il segnale degli elettroni.

3.3.5 Software d'analisi

Si elencano i software d'immagine adoperati nella cattura delle immagini a microscopio e nella seguente misurazione delle dimensioni (lunghezza e diametro) delle "fibre" di tremolite.

3.3.5.1 Leica Application Suit V3.7

Leica Application Suit (LAS) è un software d'immagine che integra i microscopi Leica (in questo caso *LEICA DM LP*; descritto in precedenza) con fotocamere digitali. Fornisce un'interfaccia utente intuitiva e una semplice navigazione durante le fasi d'acquisizione delle immagini.

LAS possiede differenti moduli operativi, quelli adoperati durante l'acquisizione delle immagini sono (Leica Application Suite, 2018):

- il *Leica LAS Multifocus*: crea un'immagine nitida attraverso la cattura di più immagini con diverse messe a fuoco;
- l'*Annotazione estesa LAS*: annota l'immagine con testo in vari tipi di caratteri, colori o misure.

Questo programma è stato utilizzato per realizzare, a microscopio, le immagini di tutti i campioni (originali e macinati) integrate con la scala grafica. È noto come il programma permetta anche di condurre misurazioni delle dimensioni delle fibre presenti nel campo d'osservazione, ma per la semplicità nei comandi si è adoperato il software DeltaPix Insight con annessa telecamera.

3.3.5.2 Deltapix Insight

DeltaPix Insight è un software d'immagine adoperato congiuntamente al microscopio ottico. Il sistema infatti permette di avere un pieno controllo delle telecamere della casa produttrice DeltaPix installate su microscopio (**Figura 3.29**).

Il programma consente:

- la regolazione del tempo di esposizione;
- la regolazione della luminosità dell'immagine;
- la cattura delle immagini ad alta risoluzione;

• la misurazione ed annotazione, eseguite su immagini fisse (catturate) o direttamente "dal vivo" sull'immagine proveniente della telecamera.

Questo software è stato adoperato per condurre la misurazione delle grandezze di nostro interesse, direttamente sull'immagine proiettata dalla telecamera sul monitor del computer (dal vivo). È stato utilizzato principalmente per quei campioni che non mostravano un campo di osservazione affollato di "fibre", come nell'esempio riportato in **Figura 3.30.**

Anche questo programma permette la cattura delle immagini, ma si è deciso di acquisirle con LAS per garantire un miglior dettaglio e definizione delle fibre, consentito in particolar modo dall'acquisizione in Multifocus.



Figura 3.29 - Telecamera DeltaPix istallata sul microscopio.

Si sono condotte le misure (lunghezza e diametro) delle fibre mediante l'uso del comando '*Riga*', impostando inizialmente la precisione e l'unità di misura (**Figura 3.31**). Per ciascun campo osservato le misure sono state registrate manualmente su documento Excel.

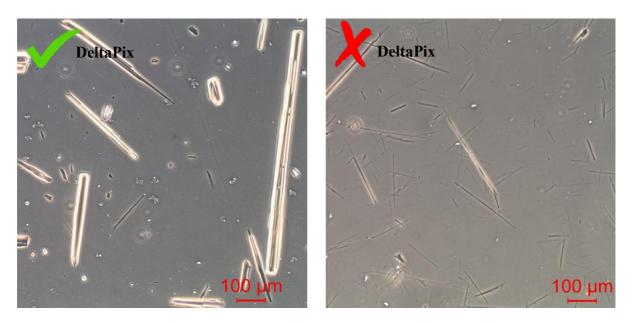


Figura 3.30 - Uso del software DeltaPix Insight: a sinistra 'Caprie iniziale' a destra 'Monastero iniziale'.

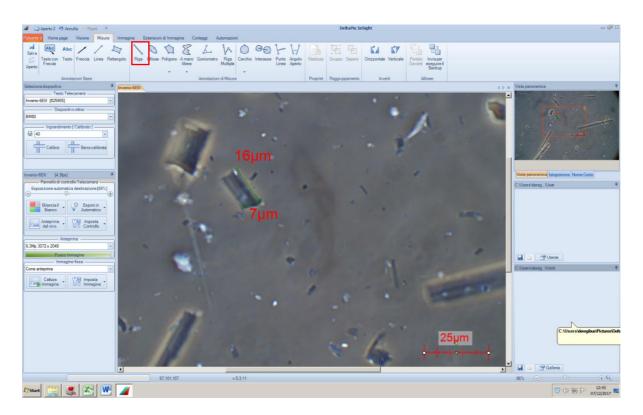


Figura 3.31 - Schermata del software Deltapix Insight: uso del comando 'Riga' per la misurazione.

3.3.5.3 *ImageJ*

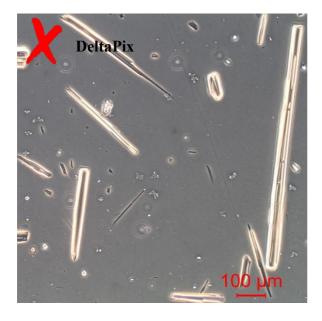
ImageJ è un software open source, realizzato in Java, facilmente scaricabile on-line in base alla tipologia di sistema operativo in possesso (< https://imagej.net/Downloads>).

Il programma consente:

- la lettura di immagini di diverso formato (.tiff, .gif, .jpeg, .bmp, etc.);
- di visionare, editare, analizzare, processare, salvare e stampare immagini in 8-bit, 16-bit e 32-bit;
- di calcolare l'area e la valutazione statistica delle selezioni personalizzate;
- di misurare angoli, distanze e creare istogrammi di densità.

Questo programma è stato adoperato per condurre le misure di lunghezza e quando possibile di diametro delle fibre, su immagini precedentemente catturate (in presenza di scala grafica) con software idoneo (in questo lavoro LAS) connesso al microscopio.

Al contrario del software DeltaPix Insight descritto precedentemente, ImageJ è stato utilizzato per campi d'osservazione affollati e in cui le 'fibre' tendevano a sovrapporsi (esempio mostrato in **Figura 3.32**).



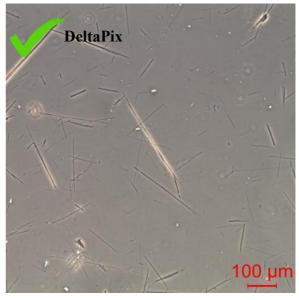


Figura 3.32 - Uso del software ImageJ: a sinistra 'Caprie iniziale' a destra 'Monastero iniziale'.

La finestra di "ImageJ" (**Figura 3.33**) è molto semplice ed è caratterizzata dalla presenza di:

- una barra dei menù;
- una barra degli strumenti;
- una barra di stato e una del progresso.

Le immagini vengono mostrate in finestre supplementari così come per i risultati della misurazione, visualizzati in una specifica finestra denominata '*Results*'.

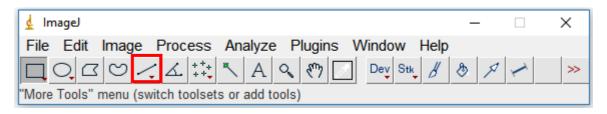


Figura 3.33 - Finestra di ImageJ all'apertura del programma, si evidenzia il comando Straight Line Selection.

La misurazione di lunghezze ed eventuali spessori, ove possibile, avviene inizialmente attraverso il tracciamento di una linea o segmento, mediante il comando 'Straight Line Selection', sovrapposta all'elemento presente nell'immagine. È fondamentale considerare che il primo segmento che deve essere tracciato è quello in sovrapposizione alla scala grafica, al fine di avere una corretta conversione pixel-micrometri.

Il passo successivo prevede che, tra il tracciamento di un segmento e quello successivo, è necessario avviare il comando 'Measure' contenuto sotto la voce 'Analyze'. Questo comando permette di realizzare la misura di ciascun segmento tracciato in precedenza. I risultati vengono elencati in una finestra addizionale, denominata 'Results', in cui ad ogni segmento corrisponde una riga e si distinguono tre colonne contenenti (Figura 3.34):

- il numero associato al segmento misurato, che consente il conteggio numerico delle 'fibre'. Il numero viene riportato automaticamente sull'immagine, al fine di ricondurre l'appartenenza del dato all'elemento corrispondente in figura (Figura 3.35);
- l'angolo (Angle);

• la lunghezza (Length).

Al termine della misurazione i risultati aventi come unità di misura il pixel, possono essere salvati in un formato idoneo a consentirne l'elaborazione in Excel e quindi la conversione in micrometri.

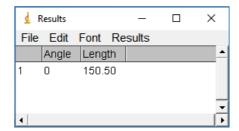


Figura 3.34 - Finestra dei risultati di ImageJ.

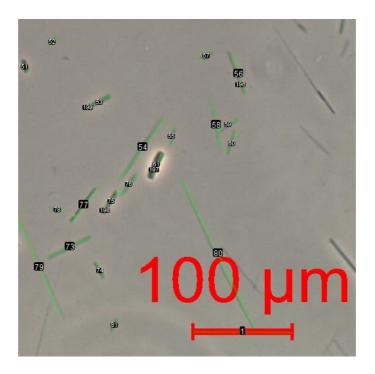


Figura 3.35 - Porzione ingrandita di un campo di osservazione del campione 'Monastero' iniziale: misurazione delle fibre e conteggio numerico.

3.4 METODOLOGIA DI ANALISI

I quattro campioni di tremolite allo stato originario (Bracchiello, Verrayes, Caprie, Monastero) sono stati osservati a MOCF (obiettivo 10x) e SEM. Circa 70 mg di ciascun campione è stato macinato con molino a masse eccentriche in agata per la durata di 1 minuto; le polveri di tremolite risultanti sono state analizzate a MOCF (obiettivo 40x) e SEM. Questa metodologia viene sintetizzata del grafico di **Figura 3.36**.

L'osservazione a MOCF del campione originario e del campione macinato è avvenuta attraverso la preparazione di vetrini pesati, immersi in olio ad indice di rifrazione n = 1,600. Perciò le quantità dei rispettivi campioni indicati in **Tabella 3.3** sono tali da rendere la lettura del vetrino il più semplice possibile grazie ad una distribuzione omogenea ed a un vetrino poco "affollato".

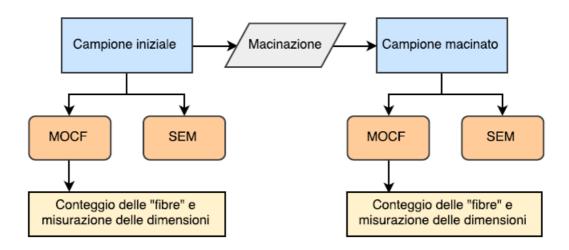


Figura 3.36 - Metodologia operativa condotta su campione: macinazione ed osservazione del preparato.

Tabella 3.3 - Peso del campione depositato su vetrino per visione a MOCF.

	Campione iniziale	Campione macinato
Campione	Peso (mg)	Peso (mg)
Bracchiello	0,6	0,3
Verrayes	0,3	0,3
Caprie	0,3	0,3
Monastero	0,2	0,3

Il conteggio e misurazione delle fibre in ciascun campo a MOCF è stato realizzato sulla base delle seguenti considerazioni.

- Nella misurazione delle fibre e/o dei "frammenti" vantanti un abito prismatico sono state acquisite le sole lunghezze di particelle aventi un'estensione maggiore di 5 μm¹¹, senza alcun limite per il diametro;
- Le fibre considerate sono quelle aventi le estremità ricadenti all'interno dell'area del reticolo, quindi le fibre eccedenti l'area non sono state considerate (Figura 3.37);
- Le aree del reticolo per il conteggio sono state scelte casualmente all'interno della superficie delimitata dal vetrino coprioggetti;
- Un agglomerato di fibre in cui le singole fibre si tocchino o si incrocino (fascio), sono state contate individualmente ogniqualvolta possano essere distinte; se non è possibile distinguere nessuna fibra singolarmente, il fascio viene contato come un'unica fibra;
- In un frammento prismatico che appare aciculare o irregolare in uno o più punti della sua lunghezza, il diametro è stato misurato lungo la sezione che non risulta interessata da rotture;
- Sono stati osservati ed analizzati un numero sufficiente di campi, per raggiungere almeno un numero di fibre superiore al 100.

Il numero di campi e fibre conteggiati in ciascun campione sono riportati in **Figura** 3.37.

dalla necessità di misurare gli spessori delle componenti prismatiche, ben maggiori di 3 µm.

-

 $^{^{11}}$ Questo limite è riscontrabile della definizione di "fibra respirabile" (lunghezza > 5 μm, diametro < 3 μm e rapporto lunghezza/diametro maggiore di 3) dettata dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 1986), ripresa dal D.M. 6/09/94. La scelta di non adoperare anche il limite previsto per il diametro è dipesa

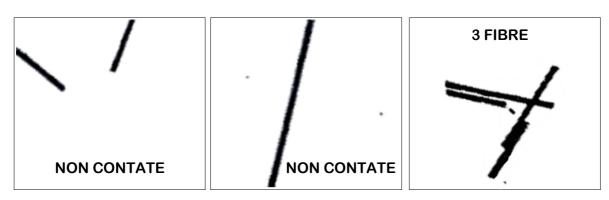


Figura 3.37 - Conteggio delle fibre che si collocano dentro o fuori il reticolo.

Tabella 3.4 - Campi di osservazione e fibre conteggiate per ciascun campione.

	Campione iniziale			Campione macinato		
Campione	n. di campi	n. di fibre	n. di campi	n. di fibre		
Bracchiello	100	240	25	331		
Verrayes	25	526	25	458		
Caprie	100	669	25	288		
Monastero	10	2929	25	358		

Obiettivo per MOCF	10x	40x
-----------------------	-----	-----

È possibile osservare che il numero di campi d'osservazione tra i campioni iniziali è molto variabile, poiché funzione della molteplicità "dimensionale" di fibre riscontrabili. Sul campione macinato, sottoposto quindi a un'azione meccanica di "omogeneizzazione" dimensionale, ci si è orientati verso l'osservazione di venticinque campi.

Per ciascuna fibra di tremolite sono stati misurati sia la lunghezza che il diametro; per campi d'osservazione leggibili a MOCF la misurazione è stata effettuata direttamente dall'immagine proveniente dalla telecamera, mentre per campi gremiti di fibre è stata effettuata sull'immagine catturata dalla telecamera. La scelta della modalità di conteggio è dipesa quindi da come il campo si presentava durante l'osservazione a MOCF, procedura riportata in modo semplificativo in **Figura 3.38**.

Dal punto di vista soggettivo, l'operatore ha espresso un giudizio sull'aspetto morfologico con cui fibre si presentano (esempio in **Figura 3.39**):

- "fibroso": per particelle lunghe e sottili;
- "prismatico": per particelle aventi spessore rilevante ed estremità piatta, da rottura planare, o aciculare;
- "aciculare": per particelle lunghe, sottili e con almeno un'estremità aghiforme;
- "fascio di fibre" ove presente: per indicare fibre indistinguibili all'interno di un fascio.

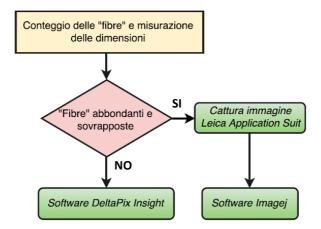


Figura 3.38 - Software di conteggio e misurazione delle fibre in funzione della distribuzione nel campo d'osservazione¹².

Un'ulteriore distinzione tra la popolazione di fibre e le componenti prismatiche (non asbestiformi) è stata condotta sulla base della definizione di "fibra asbestiforme" desunta dall'Health and Safety Executive¹³ (2005). Per l'HSE "L'abito o abitudine asbestiforme di un amianto è generalmente riconosciuta, mediante l'utilizzo di microscopio ottico, per le seguenti caratteristiche:

- Rapporto lunghezza/spessore variabile in un range da 20:1 a 100:1 o superiore per fibre più lunghe di 5 μm;
- Capacità di dividersi in fibrille molto sottili;
- Per due o più elementi tra i seguenti:

¹² La scelta di adoperare due software connessi al microscopio con due telecamere diverse, uno per l'acquisizione delle immagini e uno per la misurazione delle fibre, dipende dalla qualità dell'immagine fornita con LAS e dalla semplicità e comodità nei comandi di misurazione fornita da DeltaPix Insight.

¹³ **HSE l'Health and Safety Executive** è l'organismo di controllo per la sicurezza sul lavoro in Gran Bretagna.

84

- Fibre parallele riscontrate in fasci;
- Fasci di fibre con estremità sfilacciate;
- Fibre aciculari, ovvero a forma di sottili aghi;
- Masse confuse di singole fibre;
- Fibre che mostrano curvatura."

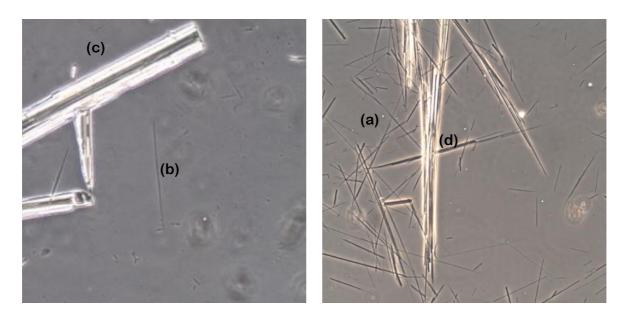


Figura 3.39 - Esempio di distinzione tra componenti: (a) fibrose, (b) aciculari, (c) prismatiche o (d) in fascio di fibre (Campione: Caprie iniziale a sinistra, Monastero iniziale a destra; 10x MOCF).

4 RISULTATI

Nel seguente capitolo vengono mostrati i risultati derivanti dall'elaborazione dei dati acquisiti durante la fase di conteggio e misurazione delle fibre di tremolite da osservazione a MOCF.

Per ciascun campione è stato creato un documento Excel all'interno del quale vengono elaborati i dati provenienti dall'analisi dimensionale e morfologica delle fibre, presenti nei campi osservati. Il documento è stato suddiviso in colonne, distinte in:

- conteggio delle fibre (numerazione);
- lunghezza in micrometri (l);
- diametro in micrometri (D);
- indicazione soggettiva di come la fibra appare morfologicamente, distinta in: fibrosa, prismatica e aciculare, o eventualmente in fascio di fibre (per l'analisi morfologica);
- rapporto lunghezza/diametro (l/D); per l'analisi dimensionale).

L'analisi morfologica delle fibre è stata condotta inizialmente su diretta osservazione della "particella" durante la misurazione, distinguendola (dal punto di vista soggettivo dell'operatore) sulla base dell'aspetto, come indicato al Paragrafo 3.4 (vedasi **Figura 3.39**).

In seguito è stata condotta una seconda classificazione incentrata sull'aspetto dimensionale delle "particelle" e principalmente basata sulla definizione di *fibra asbestiforme* dell'Health and Safety Executive (2005). Tale definizione distingue le fibre da quelle prismatiche (non asbestiformi) in funzione del rapporto lunghezza/diametro; viene considerata fibra la componente avente un rapporto lunghezza/diametro maggione di 20 (oltre a considerare altri parametri morfologici descritti al Paragrafo 3.4), mentre valori inferiori a 20 dettano la condizione di prismaticità.

Vengono mostrate in **Tabella 4.1** e **Tabella 4.2** le quantità di materiale adoperato nella preparazione dei campioni (iniziali e macinati) per l'osservazione a MOCF; vengono riportate inoltre le indicazioni sul numero di campi osservati e fibre analizzate.

Per ciascun campione i risultati sono esposti nei paragrafi seguenti dove si riportano le immagini acquisite con MOCF e SEM. Successivamente si presentano due grafici: il primo

basato sull'analisi dimensionale, ottenuto dall'elaborazione dei dati di lunghezza e diametro rilevati per ciascuna fibra nei campi d'osservazione a MOCF; il secondo invece sull'analisi morfologica, desunto dall'informazione sulla forma della fibra acquisita contemporaneamente alla misurazione, ma di natura soggettiva dell'operatore.

Il primo grafico è un istogramma delle frequenze, finalizzato a costruire una distribuzione di frequenza percentuale delle fibre ricadenti all'interno di ciascuna *classe di lunghezza (o intervallo)*. Perciò, sulla base del valore minimo di lunghezza della fibra considerata respirabile (5 μm; fibre < 5 μm sono escluse poiché definite non respirabili dal WHO (1986) e dal D.M. 6/09/1994) e del valore massimo raggiungibile dalle stesse, sono state definite delle classi o intervalli di lunghezza ed è stato effettuato il conteggio delle fibre in ciascuna classe.

Ogni rettangolo dell'istogramma è associato ad una classe ed il picco percentuale raggiunto viene definito attraverso la frequenza (%) ricavata come:

$$\%_i = \frac{(n.delle\ fibre)_i}{n.\ totale\ fibre\ osservate} \cdot 100$$
[4.1]

dove *i* è l'i-esima classe di lunghezza.

Lo stesso grafico è stato in seguito integrato ad una seconda informazione, ovvero la distinzione tra le componenti fibrose e prismatiche suggerita da l'Health and Safety Executive (2005). In questo caso, per ciascuna classe è stato determinato il numero di componenti fibrose (rapporto lunghezza/diametro maggiore a 20) ed il numero di componenti prismatiche (rapporto lunghezza/diametro inferiore a 20). Sono stete ricavate in seguito le frequenze (%) distinte in:

$$\%_{i} fibrose = \frac{(n.delle\ fibre\ con\frac{l}{D} > 20)_{i}}{n.\ totale\ fibre\ osservate} \cdot 100$$
 [4.2]

$$\%_{i} prismatiche = \frac{(n. delle \ fibre \ con \frac{l}{D} < 20)_{i}}{n. \ totale \ fibre \ osservate} \cdot 100$$

dove i è l'i-esima classe di lunghezza. Questi valori percentuali sono stati riportati sull'asse delle ascisse ed elaborati graficamente in ciascun rettangolo con distinzione cromatica: blu per le fibrose (l/D > 20) e rossa per le prismatiche (l/D < 20).

Il secondo grafico è un diagramma a torta ottenuto attraverso l'analisi morfologica e finalizzato a mostrare la percentuale di "particelle", distinte secondo l'aspetto (da diretta osservazione dell'operatore) in: fibra, componente prismatica, aciculare o come fascio di fibre. In questo diagramma vengono utilizzati per le componenti fibrose e prismatiche gli stessi colori adoperati nell'istogramma.

Tabella 4.1 - Informazioni sulla preparazione dei campioni, campi osservati e fibre analizzate a MOCF per ciascun campione iniziale.

Campioni iniziali				
Campione	Bracchiello	Verrayes	Caprie	Monastero
Peso campione (mg)	0,6	0,3	0,3	0,2
Obiettivo	10x	10x	10x	10x
Olio	1,550	1,600	1,600	1,600
Numero di campi	100 campi (20x5strisciate)	25	100 campi (20x5strisciate)	20
Area totale del vetrino (mm²)	25x25	25x25	25x25	34x40
Fibre totali analizzate	240	526	669	2929

Tabella 4.2 - Informazioni sulla preparazione dei campioni, campi osservati e fibre analizzate a MOCF per ciascun campione macinato.

Campioni macinati					
Campione	Bracchiello	Verrayes	Caprie	Monastero	
Peso campione (mg)	0,3	0,3	0,3	0,3	
Obiettivo	40x	40x	40x	40x	
Olio	1,600	1,600	1,600	1,600	
Numero di campi	25	25	25	25	
Area totale del vetrino (mm²)	25x25	25x25	25x25	25x25	
Fibre totali analizzate	331	458	288	358	

4.1 BRACCHIELLO

4.1.1 Iniziale

Per il campione originario Bracchiello sono stati analizzati a MOCF 100 campi, realizzando 5 strisciate ognuna da 20 campi, con osservazione condotta con l'obiettivo 10x. Le fibre conteggiate e misurate risultano essere pari a 240.

Il campione, essendo stato il primo ad essere osservato, è l'unico per il quale la preparazione del vetrino è avvenuta con un olio ad indice di rifrazione n pari a 1.550 (i campioni successivi sono stati realizzati con olio avente n pari a 1.600.

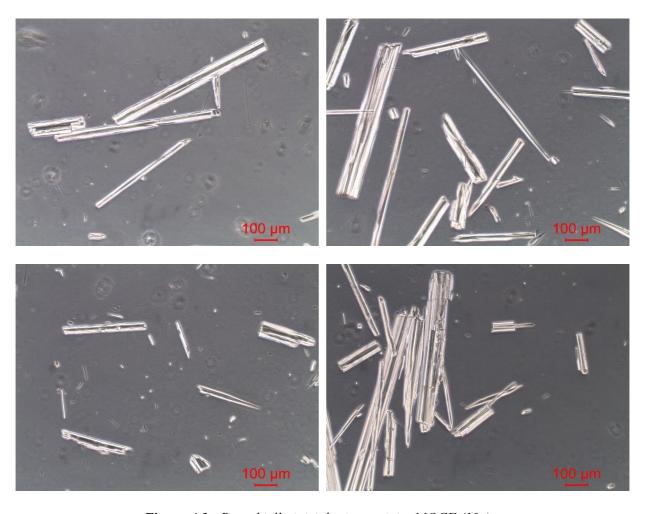


Figura 4.1 - Bracchiello iniziale: immagini a MOCF (10x).

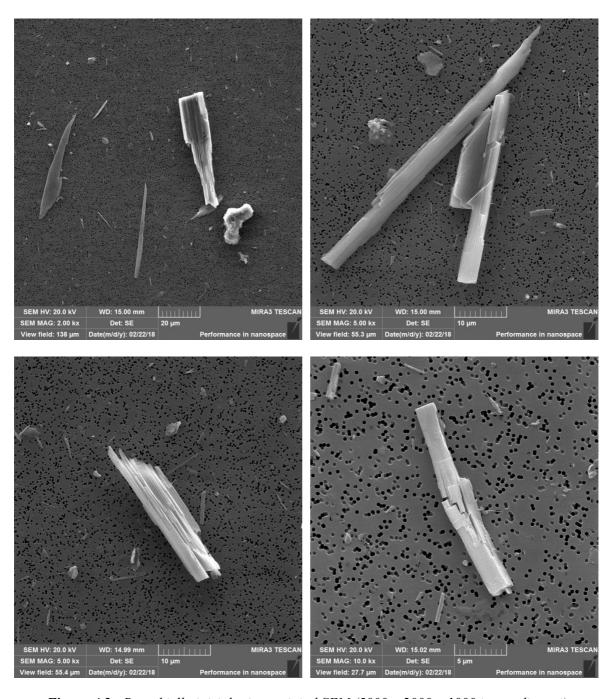


Figura 4.2 - Bracchiello iniziale: immagini al SEM (5000 – 2000 – 1000 ingrandimenti)

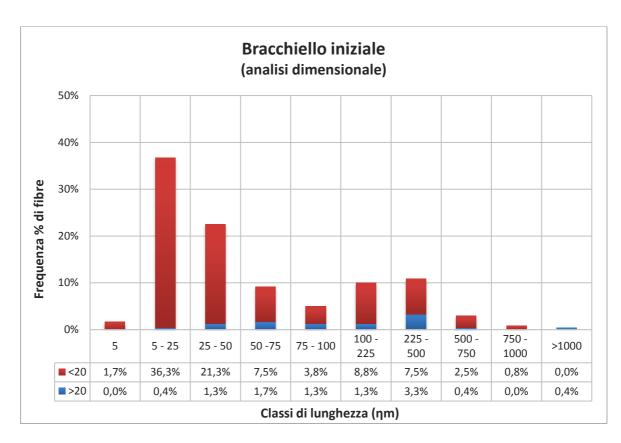


Figura 4.3 - Bracchiello iniziale: istogramma di frequenza percentuale delle fibre in ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi dimensionale.

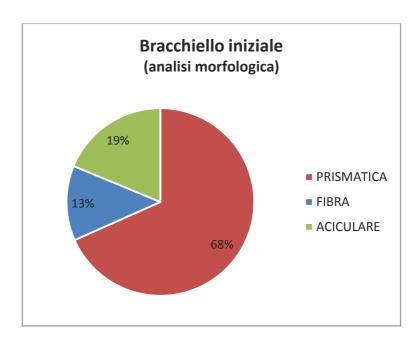


Figura 4.4 - Bracchiello iniziale: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.

4.1.2 Macinato

Per il campione macinato Bracchiello sono stati analizzati a MOCF 25 campi con osservazione condotta con l'obiettivo 40x. Le fibre conteggiate e misurate risultano essere pari a 331.

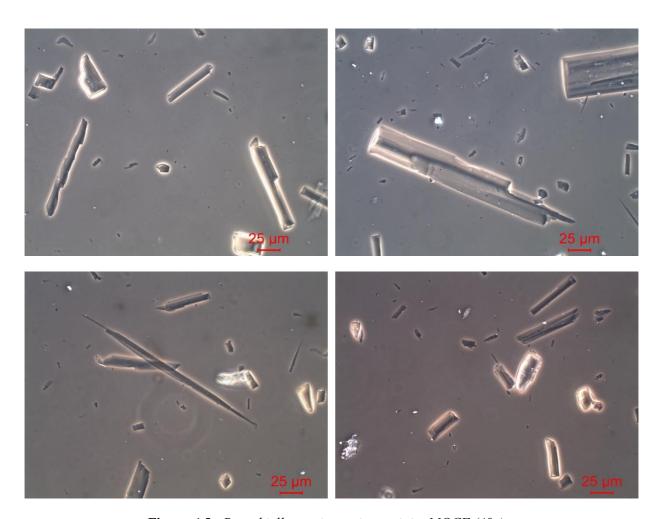


Figura 4.5 - Bracchiello macinato: immagini a MOCF (40x).

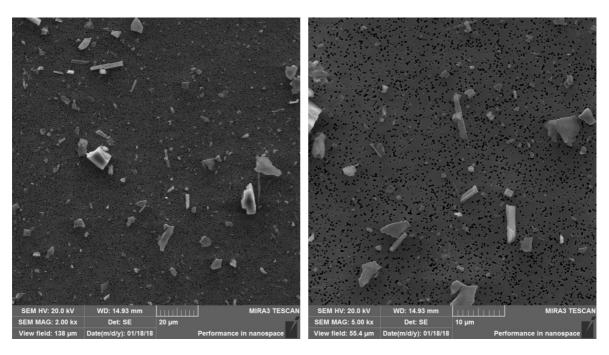


Figura 4.6 - Bracchiello macinato: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).

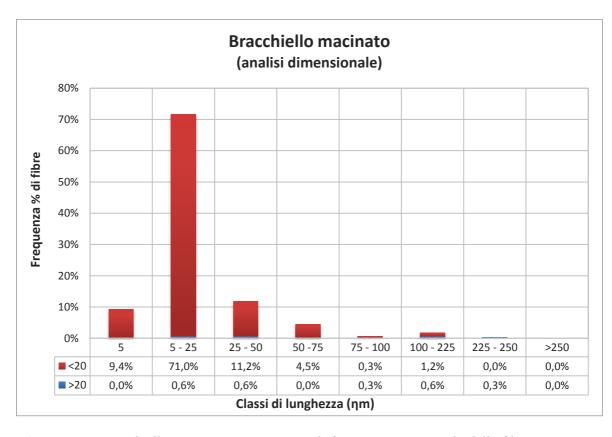


Figura 4.7 - Bracchiello macinato: istogramma di frequenza percentuale delle fibre in ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi dimensionale.

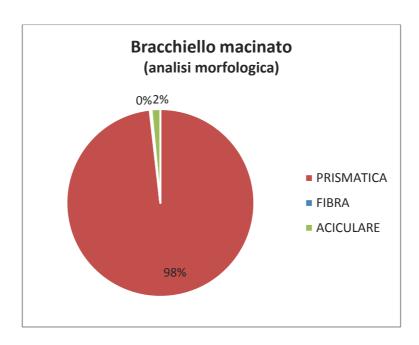


Figura 4.8 - Bracchiello macinato: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.

4.2 VERRAYES

4.2.1 Iniziale

Per il campione originario Verrayes sono stati analizzati a MOCF 25 campi con osservazione condotta con l'obiettivo 10x. Le fibre conteggiate e misurate risultano essere pari a 526.

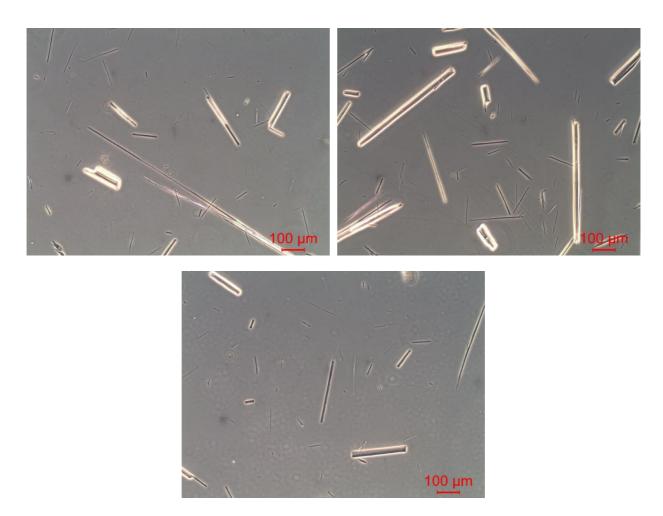


Figura 4.9 - Verrayes iniziale: immagini a MOCF (10x).

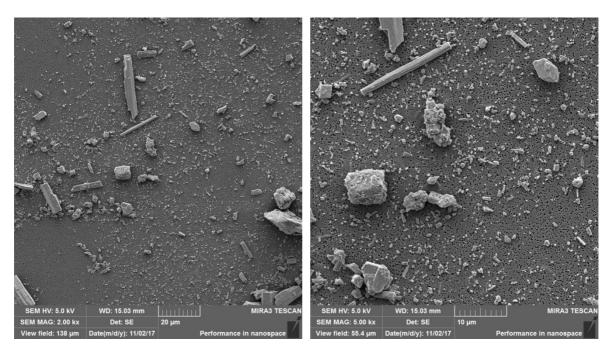


Figura 4.10 - Verrayes iniziale: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).

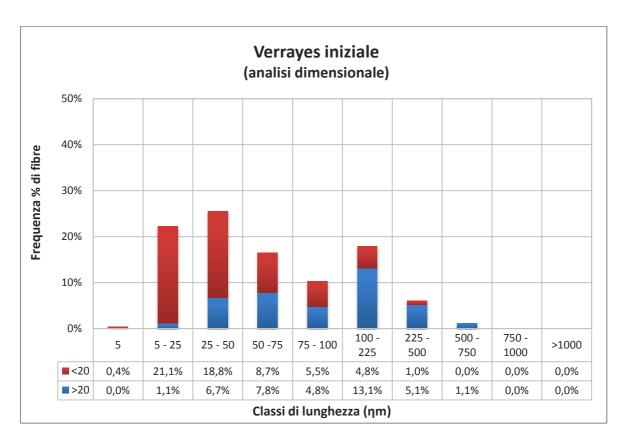


Figura 4.11 - Verrayes iniziale: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi dimensionale.

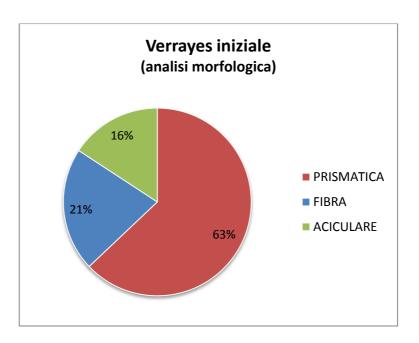


Figura 4.12 - Verrayes iniziale: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.

4.2.2 Macinato

Per il campione macinato Verrayes sono stati analizzati a MOCF 25 campi con osservazione condotta con l'obiettivo 40x. Le fibre conteggiate e misurate risultano essere pari a 458.

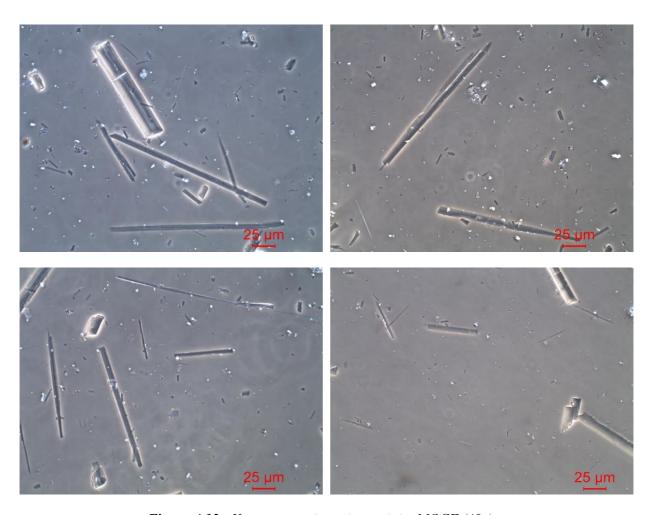


Figura 4.13 - Verrayes macinato immagini a MOCF (40x).

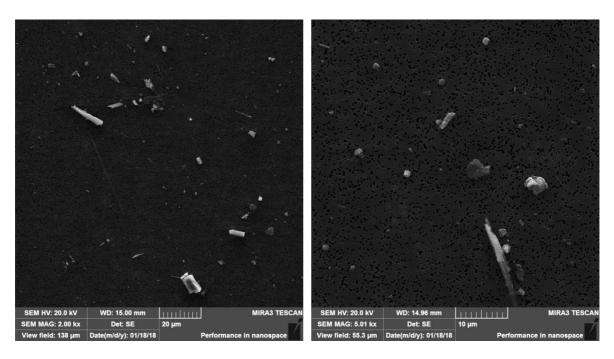


Figura 4.14 - Verrayes macinato: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).

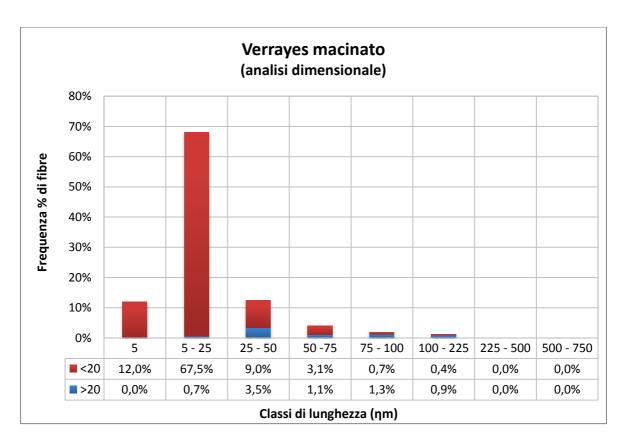


Figura 4.15 - Verrayes macinato: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi dimensionale.

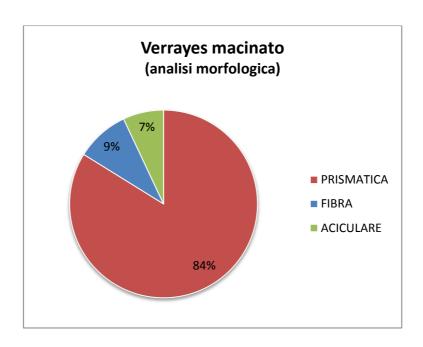


Figura 4.16 - Verrayes macinato: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.

4.3 CAPRIE

4.3.1 Iniziale

Per il campione originario Caprie sono stati analizzati a MOCF 100 campi, realizzando 5 strisciate ognuna da 20 campi, con osservazione condotta con l'obiettivo 10x. Le fibre conteggiate e misurate risultano essere pari a 669.

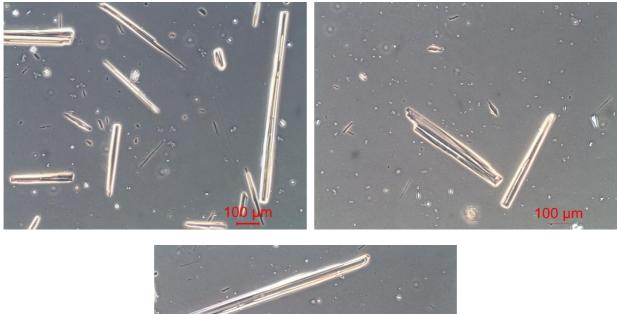




Figura 4.17 - Caprie iniziale immagini a MOCF (10x).

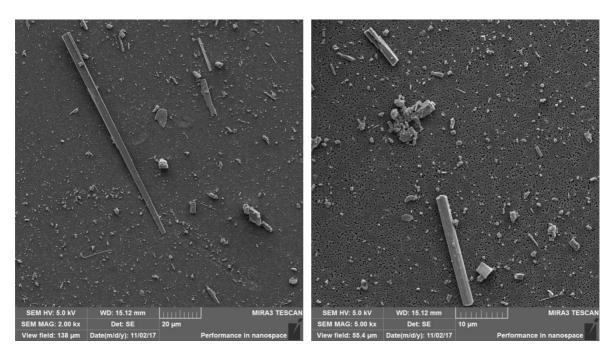


Figura 4.18 - Caprie iniziale: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).

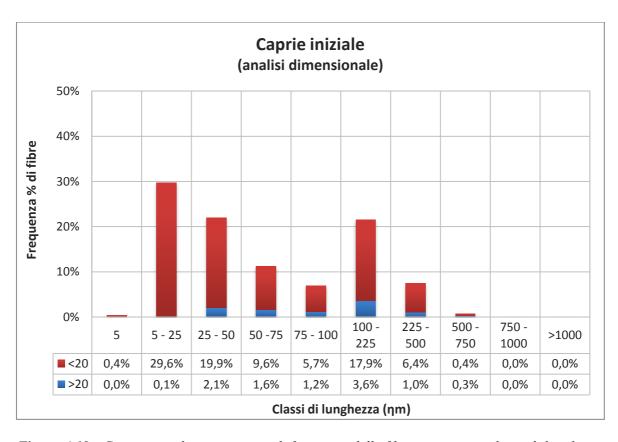


Figura 4.19 - Caprie iniziale: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi dimensionale.

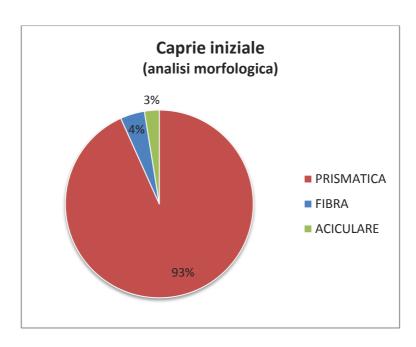


Figura 4.20 - Caprie iniziale: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.

4.3.1 Macinato

Per il campione macinato Caprie sono stati analizzati a MOCF 25 campi con osservazione condotta con l'obiettivo 40x. Le fibre conteggiate e misurate risultano essere pari a 288.

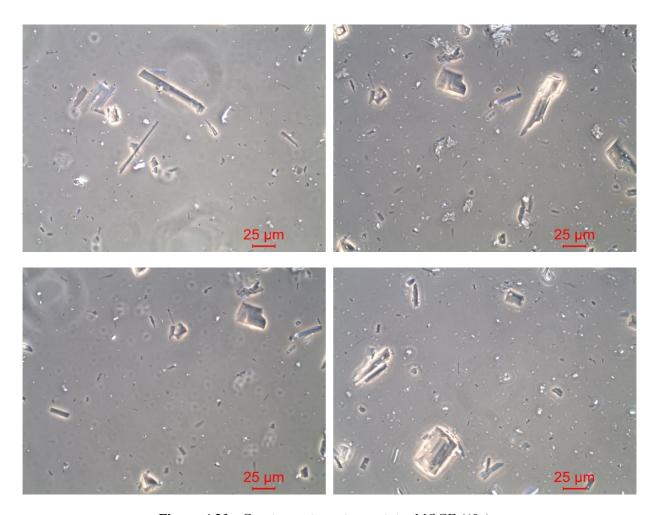


Figura 4.21 - Caprie macinato immagini a MOCF (40x).

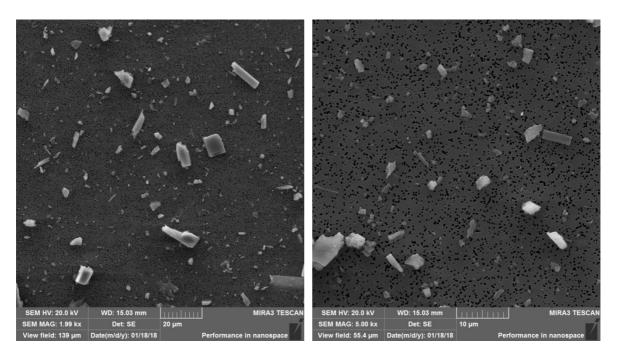


Figura 4.22 - Caprie macinato: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).

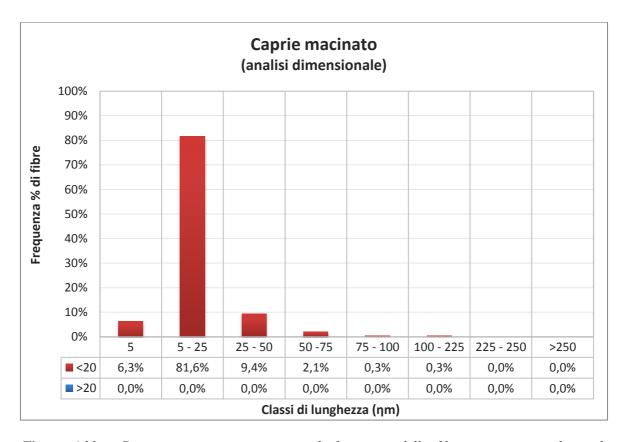


Figura 4.23 - Caprie macinato: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi dimensionale.

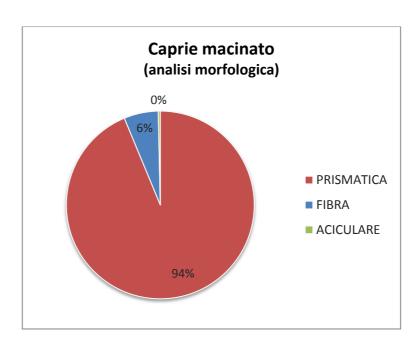


Figura 4.24 - Caprie macinato: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.

4.4 MONASTERO

La tremolite "Monastero" presenta delle caratteristiche particolari, riscontrabili anche attraverso la sola osservazione del campione ad occhio nudo.

Le prime fotografie riportate in **Allegato II**, derivanti dall'osservazione a macroscopio, mostrano il campione di tremolite allo stato originale. Il minerale si presenta apparentemente compatto, "apparente" in quanto è possibile separarne delle porzioni con il semplice aiuto di una pinzetta. Le estremità del campione sono caratterizzate da fibre aventi una maggior finezza con esaltante aspetto "cotonoso". L'ultima caratteristica, non per importanza, è la presenza di inclusioni di roccia che comportano notevoli cambiamenti al color bianco del minerale ed eventuali ripercussioni nella fase di macinazione.

Premesso che le attività di conteggio e misurazione delle fibre sono sempre state condotte sulle sole immagini al MOCF e che le immagini al SEM sono solo introdotte al fine di verificarne un riscontro, la comminuzione del campione ha incluso anche dei "granetti" osservabili nelle immagini al MOCF (campione Monastero Macinato; **Figura 4.29**) e riscontrate anche al SEM (**Figura 4.32**).

Con l'osservazione del campione immerso in olio avente indice di rifrazione *n* pari a 1.615 (**Figura 4.30** e **Figura 4.31**) ci si è assicurati che i grani, appartenenti alle inclusioni, non siano di tremolite allo stato massivo.

4.4.1 Iniziale

Per il campione originario Monastero sono stati analizzati a MOCF 20 campi, realizzando 5 strisciate ognuna da 20 campi, con osservazione condotta con l'obiettivo 10x. Le fibre conteggiate e misurate risultano essere pari a 2929.

Il campione, essendo prevalentemente fibroso, è stato l'unico per il quale nella preparazione del vetrino si è optato per l'utilizzo di un coprioggetto rettangolare (34 mm x 40 mm) e non quadrato, come per tutti gli altri campioni. Questo serve a garantire una migliore miscelazione su una superficie più ampia e una dispersione ottimale delle fibre.

Nelle immagini al MOCF e al SEM è possibile riscontrare un'elevata fibrosità.

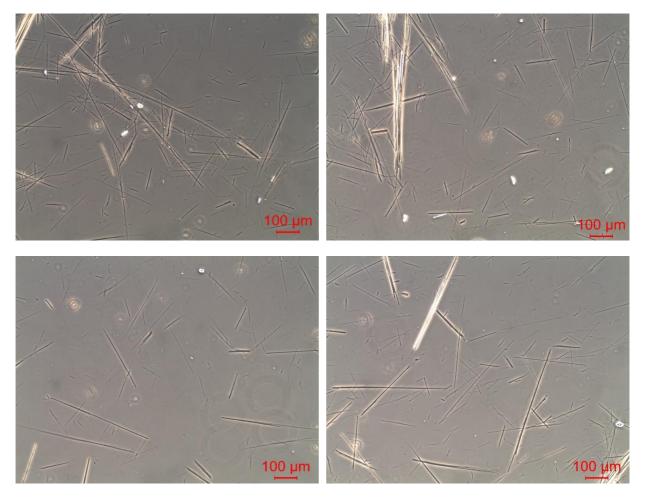


Figura 4.25 - Monastero iniziale immagini a MOCF (10x).

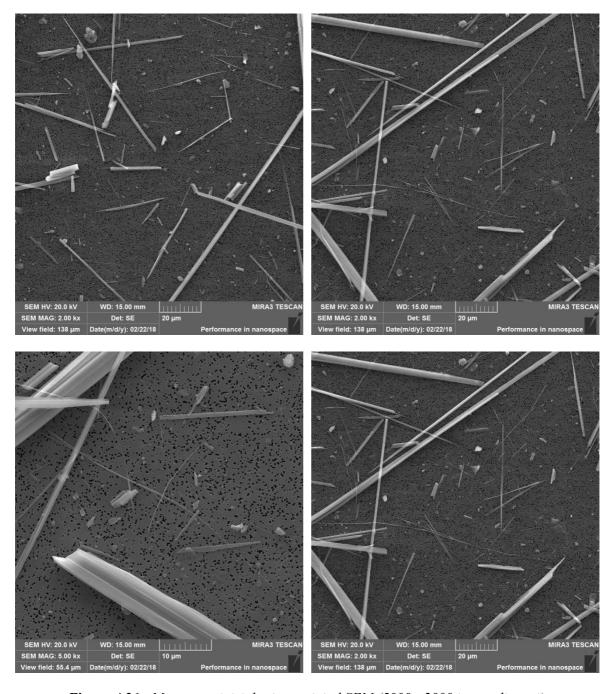


Figura 4.26 - Monastero iniziale: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).

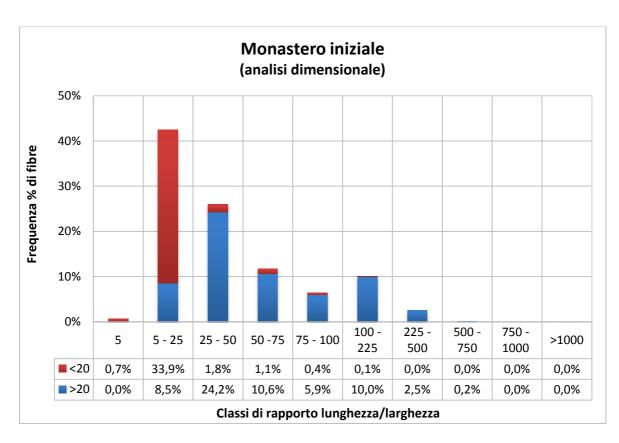


Figura 4.27 - Monastero iniziale: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi dimensionale.

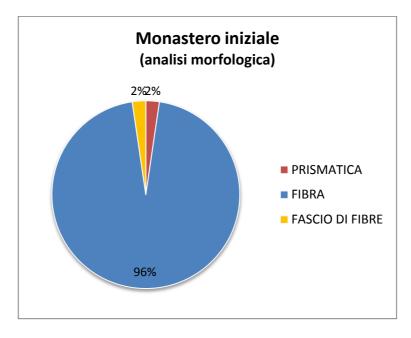


Figura 4.28 - Monastero iniziale: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.

4.4.2 Macinato

Per il campione macinato Monastero sono stati analizzati a MOCF 25 campi con osservazione condotta con l'obiettivo 40x. Le fibre conteggiate e misurate risultano essere pari a 358.

Nei campi d'osservazione catturati al MOCF e mostrati in **Figura 4.25**, è possibile osservare la presenza di elementi "granulari", congiunti o separati alle fibre, che possono essere ricondotti all'eventuale macinazione di particelle "microscopiche" appartenenti alle inclusioni di roccia mostrate in **Allegato II**.

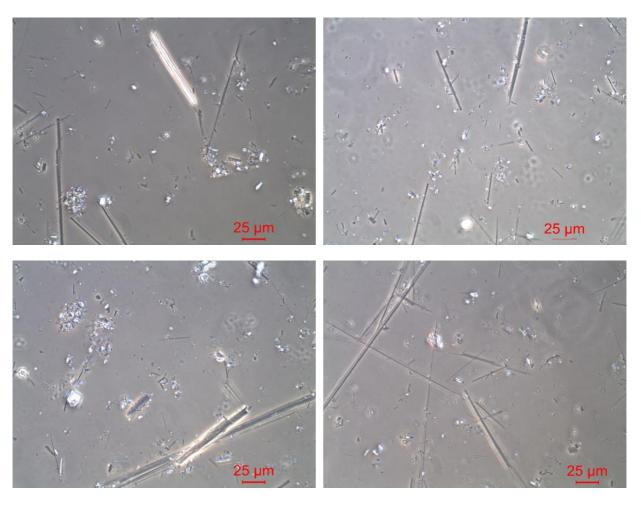


Figura 4.29 - Monastero macinato immagini a MOCF (40x).

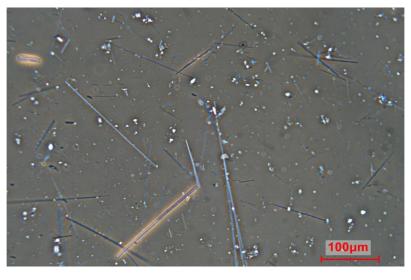




Figura 4.30 - Monastero macinato immagini a MOCF (20x).

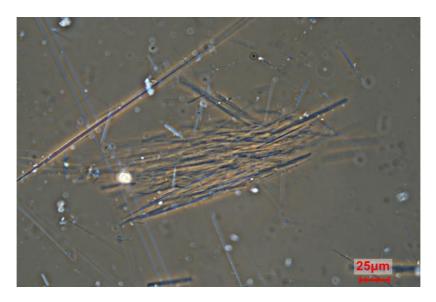


Figura 4.31 - Monastero macinato immagini a MOCF (40x).

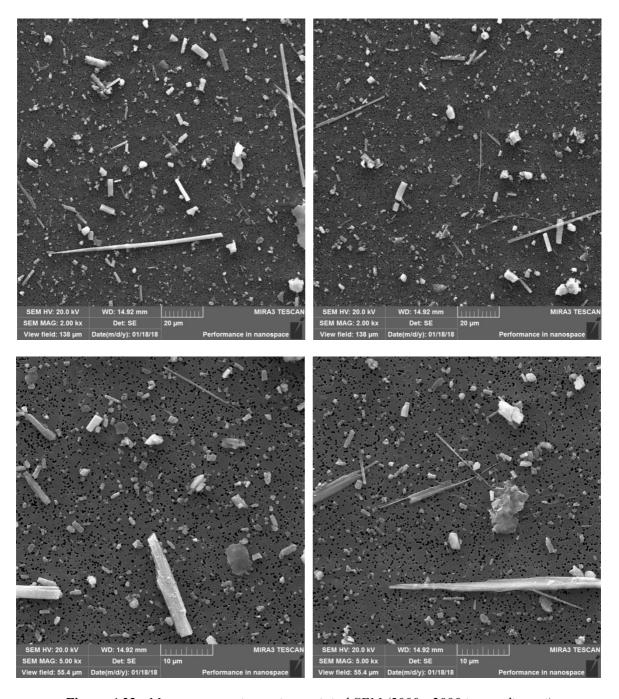


Figura 4.32 - Monastero macinato: immagini al SEM (5000 - 2000 ingrandimenti).

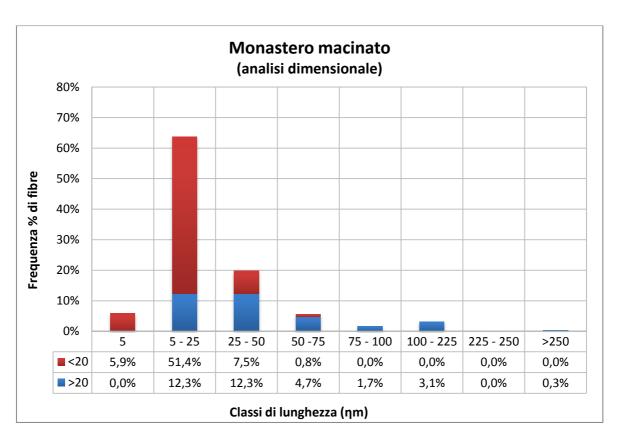


Figura 4.33 - Monastero macinato: istogramma di frequenza delle fibre in ciascuna classe di lunghezza e distinzione tra componenti fibrose e prismatiche (HSE); Analisi dimensionale.

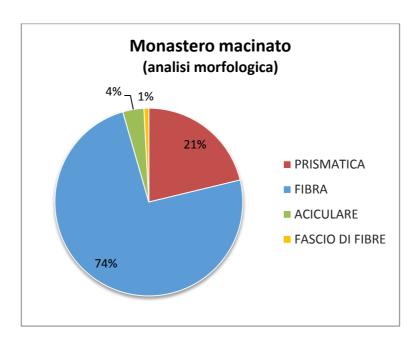


Figura 4.34 - Monastero macinato: diagramma dell'aspetto morfologico della fibra da osservazione diretta a MOCF; Analisi morfologica.

5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Nel seguente capitolo vengono rielaborati i risultati presentati precedentemente e vengono distinti e approfonditi sulla base morfologica, granulometrica e dimensionale.

5.1 ANALISI MORFOLOGICA

L'analisi morfologica è stata realizzata dall'operatore attraverso l'attribuzione di un giudizio sull'aspetto morfologico delle "particelle" di tremolite e portando quindi ad un conseguente conteggio delle componenti distinte in: "fibrose", "prismatiche", "aciculari" e "fasci di fibre" ove presenti.

Questi dati sono stati riportati per ciascun campione sotto forma di diagrammi a torta nel "Capitolo 4 – Risultati" e sono stati successivamente elaborati distinguendo percentualmente le componenti in: fibrose e prismatiche. La percentuale complessiva "fibrosa" ne considera le componenti fibrose, le aciculari (come da HSE) e i fasci di fibre.

I grafici di **Figura 5.1** mostrano il risultato di tale elaborazione, per ciascun campione (prima e dopo il processo di macinazione). Dall'osservazione dei campioni iniziali, indicati con i rettangoli arancioni, si rileva che: Caprie vanta delle componenti quasi totalmente prismatiche (90%), più attenuate per Bracchiello e Verrayes al 68-63%; Monastero invece si presenta fibrosa al 98%. L'azione di macinazione, indicata con rettangoli blu, evidenzia incrementi nella prismaticità del campione, significativi per Bracchiello e Verrayes (30%-21%) e nulli per Caprie; Monastero riduce la sua fibrosità di circa il 19% continuando però ad avere una fibrosità prevalente.

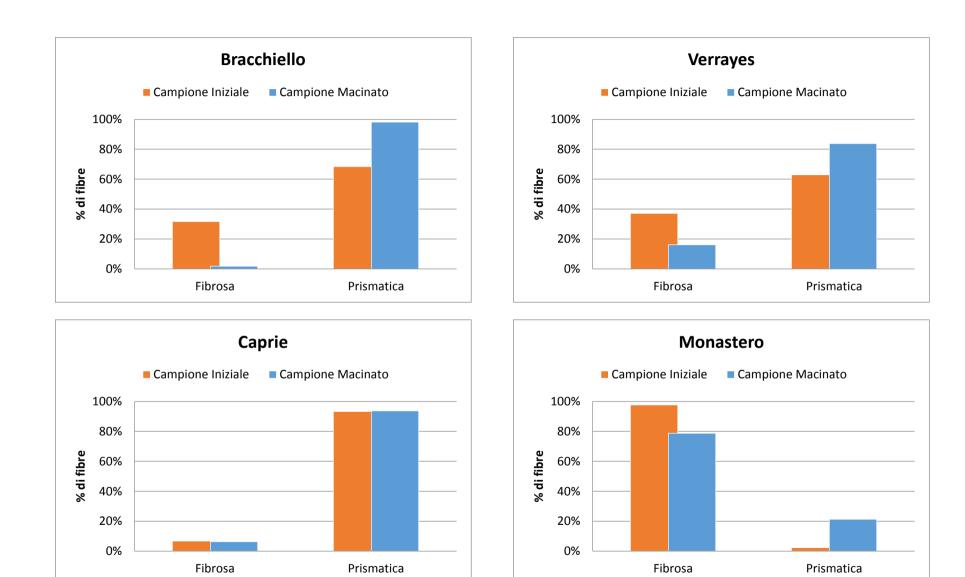


Figura 5.1 - Andamento della fibrosità e prismaticità delle fibre, prima e dopo la macinazione, in riferimento all'analisi morfologica soggettiva.

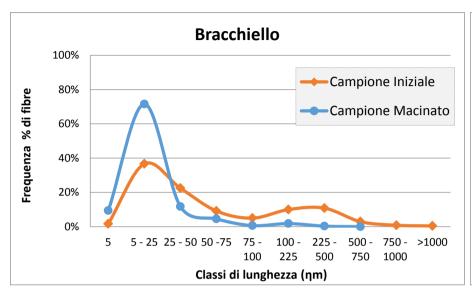
5.2 ANALISI GRANULOMETRICA

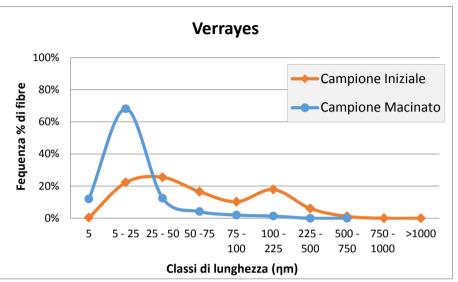
Dagli istogrammi di frequenza, riportati per ciascun campione al "Capitolo 4 – Risultati", è stato possibile delineare l'andamento della variazione granulometrica delle fibre. I cambiamenti che si verificano nella granulometria dei campioni, a seguito della macinazione, sono riportati in **Figura 5.2**; vengono mostrate due curve: una arancione per il campione iniziale ed una blu per il campione macinato

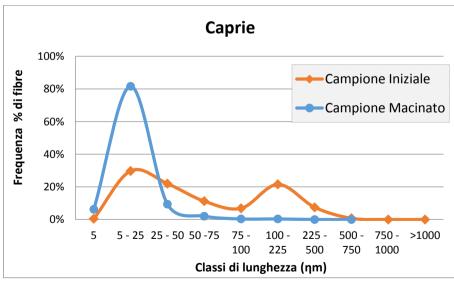
Si può osservare come gli andamenti tra un campione e l'altro risultino essere molto simili tra di loro. I campioni iniziali (curva arancione) sono caratterizzati da fibre che ricadono con una maggior frequenza nella classe 5-25 ηm, che delinea un primo picco, e nella classe 100-225 ηm, che ne delinea un secondo; una frequenza minore di fibre si riscontra tra i due picchi, più precisamente alla classe 75-100 ηm.

A differenza degli altri campioni, Verrayes e Bracchiello presentano uno tra i due picchi (rispettivamente il primo per Verrayes e il secondo per Bracchiello) sviluppati su un intervallo più ampio. Per Verrayes ricade nella classe 5-25 ηm e 25-50 ηm, mentre per Bracchiello nella classe 100-225 ηm e 225-500 ηm. Quest'ultimo campione è inoltre l'unico nel quale si riscontrano "fibre" con lunghezze maggiori a 750 ηm.

L'effetto della macinazione viene mostrato dalla curva blu; si evidenzia l'attenuazione del secondo picco (100-225 ηm) e l'accrescimento del primo (5-25 ηm). Pertanto le componenti più lunghe si riducono ed aumentano quelle corte all'interno della classe 5-25 ηm .







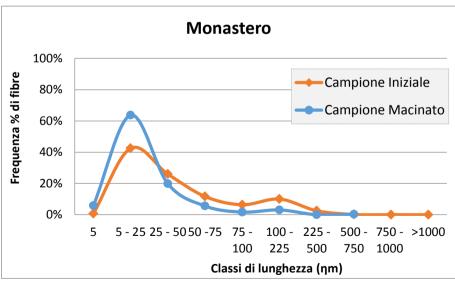


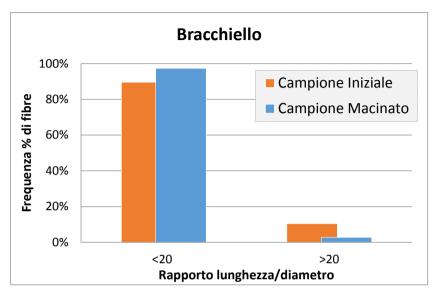
Figura 5.2 - Andamento granulometrico delle fibre di ciascun campione, prima e dopo la macinazione.

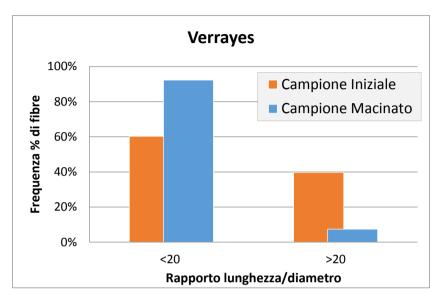
5.3 ANALISI DIMENSIONALE SECONDO DEFINIZIONE DELL'HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (2005)

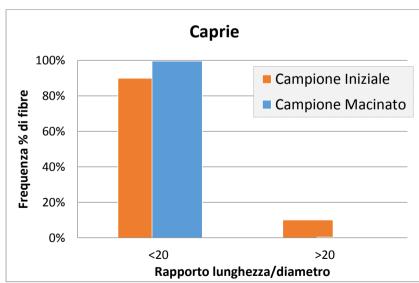
L'analisi dimensionale è stata condotta considerando la distinzione tra componente fibrosa e prismatica, dettata dalla definizione di *fibra asbestiforme* dell'Health and Safety Executive (2005). Tale distinzione si basa sul rapporto lunghezza/diametro e su altri parametri morfologici (vedasi Paragrafo 3.4); viene quindi considerata fibra la componente avente rapporto lunghezza/diametro maggione di 20, quindi valori inferiori consentono di individuare componenti prismatiche.

In **Figura 5.3** vengono riportati degli istogrammi di frequenza che mostrano come, per ciascun campione, cambi la numerosità tra le componenti fibrose (l/D > 20) e prismatiche (l/D < 20), prima e dopo il processo di macinazione.

Dall'osservazione condotta sui campioni iniziali (rettangoli arancioni) si rileva che: Bracchiello e Caprie vantano una componente prismatica più accentuata rispetto a Verrayes. Monastero invece presenta una leggera prevalenza di componente fibrosa. In seguito al processo di macinazione, si evidenzia un incremento nella componente prismatica, significativo per Verrayes e Monastero (32%-27%) e lieve per Caprie e Bracchiello (9%-7%), di natura già prevalentemente prismatiche.







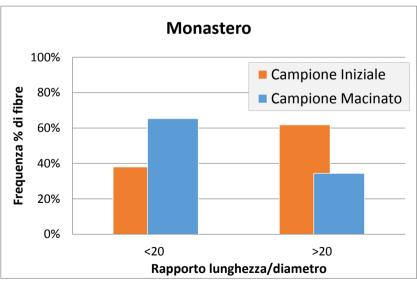


Figura 5.3 - Andamento della fibrosità e prismaticità delle fibre, prima e dopo la macinazione, in riferimento all'Health and Safety Executive (2005).

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si prefigge come obiettivo l'analisi morfologica e dimensionale delle fibre derivanti da campioni di tremolite. Tale minerale anfibolico è prevalentemente caratterizzato da processi di crescita in abiti cristallini differenti; l'abito può essere *prismatico* (non asbestiforme) o fibroso asbestiforme.

L'attività di indagine morfo-dimensionale si inserisce nell'ambito di uno studio sviluppato nel Laboratorio Analisi Amianto del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino, finalizzato a comprendere gli effetti della macinazione sull'abito del minerale per far fronte al fenomeno connesso con le perturbazioni naturali od antropiche nella tremolite rinvenibile in natura.

L'analisi si realizza attraverso procedure di conteggio delle fibre, in funzione del loro abito cristallino, e successiva misurazione delle grandezze di ogni singola "particella" mediante la tecnica d'indagine in microscopia ottica a contrasto di fase (MOCF). Questo studio si sviluppa sia sul campione tal quale che sul campione sottoposto ad un processo di comminuzione con molino a masse eccentriche.

La prima indagine, di carattere prettamente soggettivo, è stata realizzata dall'operatore attraverso l'osservazione di un numero sufficiente di campi, sui vetrini preparati con i quattro campioni di tremolite (sia prima che dopo il processo di comminuzione), da analisi al MOCF. L'ispezione ha permesso all'operatore di esprimere un giudizio sull'aspetto morfologico delle "particelle" di tremolite, portando quindi ad un conseguente conteggio delle componenti distinte in:

• "fibrose": per particelle lunghe e sottili;

- "prismatiche": per particelle aventi spessore rilevante ed estremità piatta, da rottura planare, o aciculare;
- "aciculari": per particelle lunghe, sottili e con almeno un'estremità aghiforme;
- "fasci di fibre" ove presenti: per indicare fibre indistinguibili all'interno di un fascio.

La seconda indagine, è stata realizzata dallo stesso operatore in contemporanea alla prima. Lo scopo è stato quello di condurre misurazioni nella granulometria (lunghezza e diametro) delle "particelle"¹⁴, in campi d'osservazione direttamente esaminati al MOCF o acquisiti in immagine. L'azione di misurazione ha perciò richiesto l'utilizzo di software, quali:

- DeltaPix Insight, direttamente connesso al microscopio per indagini su campi in cui la misurazione delle "particelle" risulta essere "semplice";
- ImageJ, programma esterno al microscopio che opera su immagini con esso acquisite; utilizzato principalmente su campi d'osservazione colmi di fibre.

Dal primo studio, incentrato sulla classificazione morfologica delle particelle presenti in ciascuno dei quattro campioni (prima e dopo la comminuzione), è stato possibile riscontrare che:

- ➤ i campioni iniziali si presentano distinti in due gruppi: quello a prevalenza di
 componenti fibrose (98%) comprensivo del solo campione Monastero e quello
 con maggioranza di componenti prismatiche, che comprende il campione
 Bracchiello, Verrayes e Caprie.
- ➤ il processo di comminuzione comporta in ambedue i gruppi la riduzione delle componenti fibrose e quindi l'incremento nella prismaticità, anche se Monastero continua a mantenerne un certo livello significativo di fibrosità.

Il secondo studio basato sui dati derivanti dalle dimensioni delle particelle, acquisite con i software precedentemente esposti, ha permesso di analizzare le variazioni granulometriche dei campioni, mostrati nel dettaglio in **Figura 5.2**, e di distinguere

.

¹⁴ Sono state considerate, sia nell'analisi morfologica che dimensionale, le sole "particelle" aventi lunghezza maggiore di 5 ηm (limite riscontrabile nella definizione di fibra respirabile (WHO, 1986)). Non è stato considerato, invece, alcun limite nella misurazione diametro, per la necessità di misurare gli spessori delle componenti prismatiche (ben maggiori del limite previsto dal (WHO, 1986)).

dimensionalmente le *fibre asbestiformi* sulla base del rapporto lunghezza/diametro in accordo con la definizione dell'Health and Safety Executive (2005). Analizzando inizialmente le curve granulometriche dei campioni sono state riscontrate delle analogie. I campioni mostrano fibre aventi lunghezze ricadenti con maggior frequenza nelle classi di lunghezza 5-25 ηm e 100-225 ηm; l'azione di comminuzione delle fibre porta ad un ovvio decremento delle componenti più lunghe (classe 100-225 ηm) e ad un conseguente aumento interno alla classe 5-25 ηm.

La distinzione tra componente fibrosa e prismatica derivante dall'HSE, definisce fibra la componente avente rapporto lunghezza/diametro maggione di 20:1 (oltre ad altri parametri morfologici), perciò valori inferiori dettano la condizione di prismaticità. Questa permette di confermare ciò che è stato riscontrato durante l'analisi morfologica. Si osserva perciò che:

- \triangleright i campioni iniziali di Bracchiello, Verrayes e Caprie sono caratterizzati da componenti prismatiche (l/D < 20) per circa il 60-90%, mentre Monastero è l'unico ad essere caratterizzato da fibre (l/D > 20) per circa il 60%;
- ➤ l'azione di comminuzione porta i campioni a ridurre la fibrosità e ad aumentarne proporzionalmente la prismaticità.

Si osserva quindi che, i risultati derivanti dall'analisi morfologica e dimensionale portano all'ottenimento dello stesso risultato: la riduzione della fibrosità e l'incremento della prismaticità. Un confronto tra le due analisi è stato ottenuto riassumendo le informazioni di ciascuna all'interno di un parametro, denominato Indice di Fibrosità.

È stato ricavato l'Indice di Fibrosità:

• Morfologico (IFM) di ciascun campione, prima e dopo la macinazione. Questo indice è stato calcolato in funzione alla numerosità di componenti fibrose analizzate durante l'osservazione diretta della morfologia. I dati che entrano nel calcolo derivano dai diagrammi a torta presentati per ciascun campione al "Capitolo 4 – Risultati" ed elaborati successivamente durante l'analisi morfologica.

La numerosità della componente fibrosa deriva perciò dalla somma tra il numero di fibre, il numero di componenti aciculari ed, ove presenti, il numero dei fasci di fibre.

L' *IFM* viene calcolato come segue:

$$IFM = \frac{\sum n. (di \ fibre + di \ aciculari + di \ fasci \ di \ fibre)}{n. \ di \ componenti \ totali}$$
[4.4]

Si deduce che, se:

IFM > 0,5 il campione risulta prevalentemente fibroso IFM = 0,5 il campione risulta sia fibroso che prismatico IFM < 0,5 il campione risulta prevalentemente prismatico

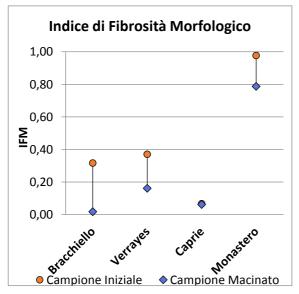
Dimensionale (*IFD*) di ciascun campione, prima e dopo la macinazione. Questo indice è stato calcolato, in funzione alla numerosità di componenti fibrose (l/D > 20 da HSE) come segue:

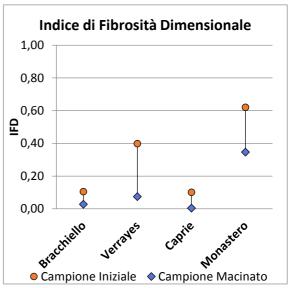
$$IFD = \frac{n.\,di\,componenti\,fibrose\,(l/D > 20)}{n.\,di\,componenti\,totali}$$
 [4.5]

Si deduce che, se:

IFD > 0.5 il campione risulta prevalentemente fibroso IFD = 0.5 il campione risulta sia fibroso che prismatico IFD < 0.5 il campione risulta prevalentemente prismatico

Nei due grafici seguenti vengono mostrati i risultati del calcolo dell'*IFM* e *IFD* sui quattro campioni distinti in base allo stato del minerale (campione iniziale o macinato).





Questo indice mostra l'intensità con cui la fibrosità si riduce in seguito al processo macinazione, a cui vengono sottoposti i campioni di tremolite. In relazione ai grafici precedenti si riporta a seguire una tabella, dove dall'effetto della macinazione sulla fibrosità permette di distinguere una riduzione: significativa, lieve e nulla.

	IFM	IFD
	Riduzione	Macinato
Bracchiello	Significativa	Lieve
Verrayes	Significativa	Significativa
Caprie	Nulla	Lieve
Monastero	Significativa	Significativa

L'introduzione dei due Indici (morfologico e dimensionale) associati a ciascuna analisi ha come obiettivo quello di condurne un confronto tra le due. Si osserva che:

- per <u>Bracchiello</u>: la comminuzione porta ad una riduzione della fibrosità, significativa nell'analisi morfologica e lieve nell'analisi dimensionale. Questo perché l'Indice di Fibrosità Morfologico e Dimensionale coincidono dopo la comminuzione ma non prima; tuttavia il campione iniziale mostra una fibrosità molto bassa, quindi si mantiene prevalentemente prismatico;
- per <u>Verrayes</u>: sia nel caso morfologico che dimensionale, la comminuzione porta ad una riduzione significativa della fibrosità. In questo caso l'Indice di Fibrosità Morfologico e Dimensionale coincidono per il campione iniziale e si evidenzia una riduzione della fibrosità post-comminuzione più accentuata nel caso dimensionale;
- per <u>Caprie</u>: sia nel caso morfologico che dimensionale, la comminuzione porta ad una riduzione della fibrosità quasi impercettibile poiché il campione non risulta fibroso, ma in maggioranza prismatico;
- per Monastero: sia nel caso morfologico che dimensionale, il campione è l'unico che allo stato originario presenta valori indicativi della sua fibrosità. La comminuzione porta ad una significativa riduzione della componente fibrosa, ma gli Indici non coincidono né per il campione iniziale né per il campione macinato. Si osserva infatti una fibrosità marcata nel caso morfologico, che rimane rilevante anche a seguito della riduzione (della

fibrosità) post-comminuzione; nel caso dimensionale, la fibrosità iniziale viene ridotta sino a rientrare nella zona a minoranza fibrosa, prevalentemente prismatica.

Ne risulta perciò che lo studio dimensionale, che implica un'indagine condotta attraverso misurazioni nella granulometria delle fibre e successivo riconoscimento delle fibre asbestiformi (HSE), porta ad ottenere un dato realistico e attendibile della composizione dei campioni e dell'effetto della comminuzione su di essi. Lo studio morfologico, basato invece sul riconoscimento soggettivo della "fibra" attraverso la semplice osservazione al MOCF, ottiene un riscontro con l'analisi precedente, ma è evidente come gli Indici di Fibrosità Morfologica si sviluppino su valori maggiori ad indicarne una possibile sovrastima nella fibrosità.

La revisione di articoli e studi da letteratura, condotti sulla tremolite e specialmente sui minerali anfibolici, ha permesso di evidenziare le modalità con le quali il cristallo tende a scindersi o rompersi in funzione dell'abito cristallino (asbestiforme e non asbestiforme). Tale indagine bibliografica è stata prevalentemente condotta sapendo che il minerale rinvenuto in natura può essere sottoposto a sollecitazioni naturali o antropiche subendo, quindi, processi di riduzione dimensionale.

Sulla base di queste informazioni, i risultati ottenuti dal processo di macinazione sui campioni di tremolite hanno permesso di individuare incrementi nella prismaticità. La rottura delle fibre avviene, quindi, secondo piani preferenziali trasversali alla "fibra" e non attraverso la generazione di "fibrille secondarie" derivanti da sfaldamento longitudinale alla fibra, tipico dei minerali asbestiformi. Si conclude osservando che la natura prismatica del campione conferisce effetti cancerogeni meno rilevanti rispetto alla natura asbestiforme.

BIBLIOGRAFIA

- Addison, J. & McConnell, E. E., 2008. A review of carcinogenicity studies of asbestos and non-asbestos tremolite and other amphiboles. Regulatory Toxicology and Farmacology, Volume 52, pp. s187-s199.
- Agency for Toxic Substances and Desease Registry, 2003. The Report on the Expert Panel on Health Effects of Asbestos and Synthetic Vitreous Fibers: The Influence of Fiber Length. [Online]

 Consultabile al sito: https://www.atsdr.cdc.gov/hac/asbestospanel/finalpart1.pdf
 [Consultato il giorno 31 Gennaio 2018].
- Amico, A. & Bellomia, G., 2003. *Amianto. Normativa e metodologie per la bonifica*. I a cura di Palermo: Dario Flaccovio.
- AQUARIA srl, s.d. Cappe aspiranti a flusso laminare e chimiche per laboratori.

 [Online]

 Consultabile al sito: http://www.aquariasrl.com/h3o/wpcontent/uploads/2016/01/

 CATALOGO-GENERALE_Cappe-chimiche-e-a-flusso-laminareo_rev.2.pdf

 [Consultato il giorno 27 Gennaio 2018].
- Arpa Emilia Romagna, 2007. Le fibre artificiali vetrose: classificazione, esposizione, danni per la salute e misure di prevenzione. [Online]

 Consultabile al sito: https://www.arpae.it//cms3/documenti/amianto/fibre.pdf
 [Consultato il giorno 12 Gennaio 2017].
- Arpa Piemonte, 2008. Amianto naturale in Piemonte: Cronistoria delle concessioni e dei permessi di ricerca mineraria. Savigliano (CN): Arpa Piemonte.

- Arpa Piemonte, s.d. Arpa *Normative sull'amianto*. [Online]

 Consultabile al sito: http://www.arpa.piemonte.gov.it/approfondimenti/
 temiambientali/amianto/normativa-europea
 [Consultato il giorno 5 Gennaio 2018].
- Arpa Valle d'Aosta, s.d. *Sezione Analisi Strutturali e Amianto*. [Online] Consultabile al sito: www.associazionetutelaterritorio.org/images/TERRITORIO cave%20discarichecave%20dismesse/Presenza_naturale_di_amianto_verde%20V alle%20d'Aosta.pdf
 [Consultato il giorno 25 01 2018].
- Arpa Veneto, 2013. *Amianto: Quali malattie può provocare*. [Online] Consultabile al sito: http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/amianto/qualimalattie-puo-provocare [Consultato il giorno 13 Gennaio 2018].
- Asbestos Nation, s.d. *Asbestos bans around the world*. [Online]

 Consultabile al sito: http://www.asbestosnation.org/facts/asbestos-bans-around-the-world/

 [Consultato il giorno 5 Febbaraio 2015].
- ASSOAMIANTO, s.d. ASSOAMIANTO *Normativa Europea*. [Online] Consultabile al sito: http://www.assoamianto.it/normativa_europea.htm [Consultato il giorno 5 Gennaio 2018].
- ASSOAMIANTO, s.d. ASSOAMIANTO *Normativa Nazionale*. [Online] Consultabile al sito: http://www.assoamianto.it/normativa_nazionale.htm [Consultato il giorno 5 Gennaio 2018].
- ASSOAMIANTO, s.d.. Valori limite amianto previsti dalla legislazione italiana.

 [Online]

 Consultabile al sito: http://www.assoamianto.it/VALORI%20LIMITE%20

 AMIANTO%20%20SUPPLEMENTO%20ASSOAMIANTO%20%20AMBIENT

E%20&%20SICUREZZA%20-%20GRUPPO%2024%20ORE.pdf

[Consultato il giorno 8 Gennaio 2018].

- Bacaloni, A., 2013. *Presentazione amianto*. [Online]

 Consultabile al sito: https://www.chem.uniroma1.it/sites/default/files/allegati_
 insegnamento/Amianto%25202013_1.pdf

 [Consultato il giorno 24 Gennaio 2018].
- Benvenuti, P. & Di Fabbio, A., s.d. *La Repubblica Mini Dossier Amianto*. [Online]

 Consultabile al sito: http://static.repubblica.it/laprovinciapavese/pdf/materiali/
 01.pdf

 [Consultato il giorno 5 Gennaio 2008].
- Borin, A., Bai, E., Ciafani, S. & Zampetti, G., 2011. *Dossier Amianto*, s.l.: Intesa Sanpaolo e Legambiente.
- Bozzola, J. J. & Russell, L. D., 1999. *Electron Microscopy: Principles and Techniques for Biologists*. 2nd a cura di USA: Jones & Bartlett Learning.
- Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbe, Kreditanstalt für Wiederaufbau, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbe & ERM Umwelt Consult Rhein-Main-Neckar, 1996. *Asbestos: overview and handling recommendations*. ill. a cura di Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- Campbell, W. J., Steel, E. B., Virta, R. L. & Eisner, M. H., 1979. *Relationship of mineral habit to size characteristics for tremolite cleavage fragments and fibers*. US Bureau of Mines Report of Investigation, Issue 8367, p. 18.
- Carnevale, F., 2011. *L'amianto nei paesi in via di sviluppo*. [Online] Consultabile al sito: http://www.saluteinternazionale.info/2011/04/1%E2%80%99 amianto-nei-paesi-in-via-di-sviluppo/ [Consultato il giorno 5 Gennaio 2018].
- Compagnoni, R., Ferraris, G. & Fiora, L., 1983. *Balangeroite, a new fibrous silicate related to gageite from Balangero, Italy*. American Mineralogist, Volume 6, pp. 214-219.
- Compagnoni, R. & Groppo, C., 2006. Gli amianti in Val di Susa e le rocce che li contengono. Rendiconti della Società Geologica Italiana, pp. 21-28.

- Cook, W. E., 1927. *Pulmonary asbestosis*. British Medical Journal, pp. 1024-1025.
- Dana, S. D. & Ford, W. E., 1932. *A Textbook of Mineralogy*. New York: J. Wiley and Sons.
- Davis, J. M. G. et al., 1985. *Inhalation studies on the effects of tremolite and brucite dust in rats. Carcinogenesis*, Volume 5, pp. 667-674.
- Davis, J. M. G. et al., 1991. *Variations in the carcinogenicity of tremolite dust samples of differing morphology*. Annals of the New York Academy of Sciences, Volume 643, pp. 415-430.
- Deer, W. A., Howie, R. A. & Zussman, J., 1985. *An introduction to the rock-forming minerals*. 2nd a cura di Harlow, England: Longman.
- Deer, W. A., Howie, R. A. & Zussman, J., 1992. An introducion to the rock froming-minerals. 2nd ed. a cura di Longman: s.n.
- Di Maso, F., 2011. *Amianto: Il più grande cancerogeno del '900*. s.l.:Gangemi Editore spa.
- Doll, R., 1955. *Mortallity for lung cancer in asbestos workers*. British Journal of Industrial Medicine, Issue 12, pp. 81-86.
- Dorling, M. & Zussman, J., 1987. *Characteristics of asbestiform and non-asbestiform calcic amphiboles*. Lithos, 20(6), pp. 469-489.
- EUR-Lex, s.d. *EUR-Lex: Access to European Union law*. [Online] Consultabile al sito: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri= URISERV:c11134&from=IT [Consultato il giorno 5 Gennaio 2018].
- Fioravanti , G., 2016. Chimica delle superfici ed interfasi. [Online] Consultabile al sito: http://ing.univaq.it/fioravanti/chimica/Corso%20Chimica% 20delle%20Superfici%20ed%20Interfasi/Lucidi%20Lezioni/14_Microscopia_elet tronica_2016_17.pdf
 [Consultato il giorno 18 Gennaio 2018].

- Fubini, B., s.d. *Il timore di ciò che non si vede: polveri, fibre e nanoparticelle*. [Online]

 Consultabile al sito: http://www.instm.it/public/27/la_chimica_dei_materiali_ed

 _il_concetto_di_ris.pdf

 [Consultato il giorno 26 Febbraio 2018].
- Fun Science Gallery, s.d. *Tecniche per la ricerca e l'identificazione dell'amianto a microscopio*. [Online]

 Consultabile al sito: http://www.funsci.com/fun3_it/sini/mo/amianto.pdf

 [Consultato il giorno 18 Gennaio 2018].
- Gamble, J. F. & Gibbs, G. W., 2008. An evaluation of the risks of lung cancer and mesothelioma from exposure to amphibole cleavage fragments. Regulatory Toxicology and Pharmacology, Volume 52, pp. S154-S186.
- Gattiglio, M. & Sacchi, R., 2006. *Lineamenti geologici della Val di Susa lungo il tracciato del progetto TAV Torino-Lione*. Rendiconti Società Geologica Italiana, Volume 3, pp. 13-19.
- Health and Safety Executive, 2005. Asbestos: The analysts' guide for sampling, analysis and clearance procedures. s.l.:s.n.
- Hora, H. Z., 1997. *Ultramafic hosted chrysotile asbestos. British Columbia Ministry of Employment and Investment*, Issue 1998-1, pp. 24 k-1 to 24 k-4.
- I.G.M, 1959. Carta Geolofica d'Italia settore Italia Settentrionale (scala 1:100000).[Online]Consultabile al sito: http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/nord.htm[Consultato il giorno 26 Gennaio 2018].
- IARC, 1977. Monographs on the evaluation of the risk to human. IARC Scientific Publication International Agency for Research on Cancer, Volume 14.
- IARC, 1987. Monograph on the evaluation of the risk to human- Asbestos Supplement 7. IARC Scientific Publication International Agency for Research on Cancer.
- Ilgren, E. B. & Penna, B. M., 2004. *The Biology of Cleavage Fragments: A Brief Synthesis and Analysis of Current Knowledge*. Indoor and Built Environment, 19 Giugno, p. 14.

- Kazan-Allen, L., 2018. *Current Asbestos Bans*. [Online] Consultabile al sito: http://www.ibasecretariat.org/alpha_ban_list.php#1 [Consultato il giorno 4 Gennaio 2018].
- Kazan-Allen, L. & Allen, D., 2015. Latest Global Asbestos Data. [Online] Consultabile al sito: http://www.ibasecretariat.org/lka-latest-global-asbestos-data.php [Consultato il giorno 4 Gennaio 2018].
- Langer, A. M., Nolan, R. P. & Addison, J., 1991. Distinguishing between amphibole asbestos fibers and elongate cleavage fragment of their non-asbestos analogues.

 In: Mechanism in Fibre Carcinogenesis. New York: Plenum Press, pp. 253-267.
- Leica Application Suite, 2018. *Specifiche tecniche: Leica Microsystem*. [Online] Consultabile al sito: https://www.leica-microsystems.com/products/microscope-software/details/product/leica-application-suite/specification/
- Malinconico, S., Paglietti, F., Rimoldi, B. & Sala, O., 2011. *CPRM Natural Occurring asbestos in Italy*, s.l.: 4th International Conference on Medical Geology.
- Marconi, A., 1982. L'identificazione delle fibre di asbesto per mezzo della tecnica microscopica della dispersione cromatica. Annali dell'Istituto Superiore della Sanità, Volume 18, pp. 911-914.
- Marinaccio, A., Binazzi, A. & Bonafede, C., 2015. *Il Registro Nazionale dei Mesoteliomi V Rapporto*, Milano: INAIL.
- Marini, P., 2015. Procedure operative e analitiche di dettaglio utilizzate nel Laboratorio Analisi Amianto del DIATI- Politecnico di Torino. Torino: s.n.
- Meeker, G. P. et al., 2003. *The composition and morphology of amphiboles from Rainy Creek Complex, near Libby, Montana*. American Mineralogist, Volume 88, pp. 1955-1969.
- Ministero della Salute, 2012. Stato dell'arte e prospettive in materia di contrasto alle patologie asbesto correlate. Quaderni del ministero della Salute, maggio-giugno, Issue 15, p. 37.

- Ministero della Salute, s.d. *Sintesi delle conoscenze relative all'esposizione e al profilo tossicologico Amianto*. [Online]

 Consultabile al sito: http://www.salute.gov.it/portale/temi/documenti/acque potabili/parametri/Val_Amianto_documento_completo.pdf

 [Consultato il giorno 12 Gennaio 2018].
- National Research Council (US), 1984. *Asbestiform Fibers Nonoccupational Health Risks*. Washington (DC): National Academies Press (US).
- O'Hanley, D. S., 1986. Origin and the mechanical properties of asbestos, Minneapolis (US): University of Minnesota.
- Peters, G. A. & Peters, B. J., 1988. *Pathology, Immunology and GeneTherapy. In:*Sourcebook on Asbestos Diseases: Causation, Diagnosis, Therapy and Related Aspects. USA: Lexis Law Publishing.
- Petrus, 2012. *Nanotubi di carbonio, amianto e mesotelioma*. [Online] Consultabile al sito: http://leganerd.com/2012/03/29/nanotubi-di-carbonio-amianto-e-tumore/
 [Consultato il giorno 12 Gennaio 2018].
- Povtak, T., s.d. *Asbestos Exposure*. [Online]
 Consultabile al sito: https://www.asbestos.com/exposure/
 [Consultato il giorno 18 Gennaio 2018].
- Regione Piemonte, 2016. *Piano Regionale Amianto 2016-2020*. [Online] Consultabile al sito: http://www.regione.piemonte.it/ambiente/bonifiche/dwd/Documento_PRA%20definitivo.pdf
 [Consultato il giorno 15 Gennaio 2018].
- Romano, A., 2016. *Indroduzione alla microscopia*. [Online]
 Consultabile al sito: https://www.docenti.unina.it/webdocentibe/allegati/materiale-didattico/563836
 [Consultato il giorno 24 Gennaio 2018].
- Ross, M., 1981. The geological occurrences and health hazards of amphiboles and serpentine. Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy, A(9), pp. 279-323.

- Schreirer, H., 1989. *Asbestos in the Natural Environment*. 1st a cura di Amsterdam: Elsevier.
- Shmidt, K. G., 1985. *Die Phasenkontrastmikroskop in der Staubtechnik*. Staub, Volume 41, p. 436.
- Smith, W., Hubert, D., Sobel, H. & Marquet, E., 1979. *Biologic tests of tremolite in hamsters*. Patholox Pub, Volume Dust and Desease, pp. 335-339.
- Stanton, M. et al., 1981. Relation of particle dimension to carcinogenicity in amphibole asbestos and other fibrous minerals. Journal of the National Cancer Istitute, pp. 965-975.
- Terracini, B., 2017. Canada annonunce ban on asbestos. Historic defeat of one of the most powerful industrial lobbies. Epidemiologia & Prevenzione, gennaio-febbraio, 41(1), pp. 11 12.
- Timbrell, V., Griffiths, D. & Pooley, F., 1971. *Possible importance of fiber diameters of South African Amphiboles*. Nature, Volume 232, p. 55–56.
- Valberg, P. & Blanchard, J., 1991. *Pulmonary macrophage physiology: origin, motility, and endocytosis*. In: *Comparative Biology of the Normal Lung*. Florida: CRC Press, Boca Rotan, pp. 618-715.
- Vittone, E., 2016. Microscopio a scansione elettronica dalle lezioni del prof. Vittone.

 [Online]

 Consultabile al sito: https://www.abidibo.net/media/pages/projects/doc/sem.pdf

 [Consultato il giorno 18 Gennaio 2018].
- Wagner, J. C. et al., 1982. *Biological effects of tremolite*. British Journal of Cancer, 45(952), pp. 352-360.
- Wagner, J. C., Slegs, C. & Marchands, P., 1960. Diffuse pleural mesothelioma and asbestos exposure in the north Western Cape Province. British Journal of Industrial Medicine, Issue 17, pp. 260-271.
- WHO, 1986. Asbestos and other natural mineral fibers, Geneva: World Health Organization.

- WHO, 2000. *Air quality guidelines for Europe*. 2nd edition a cura di s.l.:WHO regional publications.
- Wiebelt, F. J. & Smith Clair, M., 1959. A Reconnaissance of Asbestos Deposit in the Serpentine Belt of Nortgern California. U.S. Bureau of Mines Information, Issue Circular 7860, p. 52.
- Wylie, A., 1990. Testimony on behalf of the National Stone Association Re: OSHA Notice of Proposed Rulemaking, Occupational Exposure To Non-Asbestiform Tremolite, Anthophyflite And Actinolite. Federal Register, 12 Febbraio, 55(H-033-d), p. 4938.
- Wylie, A. & Mossman, B., 1997. Mineralogical features associated with cytotoxic and proliferative effects of fibrous talc and asbestos on tracheal epithelial and pleural mesothelial cells. Journal of Toxic and Applied Pharmacology, Volume 147, p. 153–160.
- Zoltai, T., 1979. Asbestiform and acicular mineral fragments. Annals of the New York Academy of Sciences, Volume 330, pp. 621-643.

FONTI NORMATIVE

Fonti italiane

Circolare del Ministero della Sanità del 10 luglio 1986, n. 45.

Decreto del Presidente della Repubblica del 24 maggio 1988, n.215.

Legge del 27 marzo 1992, n.257.

Decreto Ministeriale del 12 febbraio 1997.

Decreto Ministeriale del 20 agosto 1999 e s.m.i..

Deliberazione del 1 febbraio 2000.

Decreto Ministeriale del 25 luglio 2001.

Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 10 dicembre 2002, n.308.

Circolare Albo Nazionale Gestori Rifiuti del 21 aprile 2004, n.2700.

Decreto Ministeriale del 14 dicembre 2004.

Decreto Legislativo del 3 aprile 2006, n.152.

Decreto Legislativo del 25 luglio 2006, n.257.

Decreto Legislativo del 10 agosto 2012, n.161.

Legge del 9 agosto 2013, n. 98.

Decreto del Presidente della Repubblica del 13 giugno 2017, n.120.

Decreto Ministeriale del 18 marzo 2003, n.101.

Decreto del Presidente della Repubblica del 30 giugno 65, n.1124.

Decreto Interministeriale del 18 aprile 1973.

Decreto Interministeriale del 16 ottobre 1986.

Decreto del Ministero del Lavoro e della Providenza Sociale del 21 gennaio 1987.

Decreto del Ministero del Lavoro e della Providenza Sociale del 20 giugno 1988.

Decreto Legislativo del 15 agosto 1991, n.277.

Decreto Legislativo del 09 aprile 2008, n.81.

Decreto Legislativo del 03 agosto 2009, n.106.

Circolare del Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali del 25 gennaio 2011.

Decreto Ministeriale del 29 luglio 2004, n.248.

Decreto Legislativo del 17 marzo 1995, n.114.

Decreto Legislativo del 5 febbraio 1997, n.22.

Legge del 9 dicembre 1998, n.426.

Decreto del Presidente della Repubblica del 8 agosto 1994.

Circolare del Ministero della Sanità del 10 luglio 1986, n. 45.

Decreto Ministeriale del 25 agosto 1999, n.471.

Decreto Ministeriale del 3 maggio 2005.

Decreto Ministeriale del 26 aprile 89.

Decreto Ministeriale del 6 settembre 1994.

Decreto Ministeriale del 26 ottobre 1995.

Decreto Ministeriale del 14 maggio 1996.

Decreto Ministeriale del 07 luglio 1997.

Fonti Europee

Direttiva 83/477/CEE

Direttiva 83/478/CEE

Direttiva 87/217/CEE

Direttiva 1999/77/CE

Direttiva 2003/18/CE

Direttiva 2004/37/CE

Regolamento CE n.1272/2008

Direttiva 2009/148/CE

SITOGRAFIA

https://imagej.net/Downloads

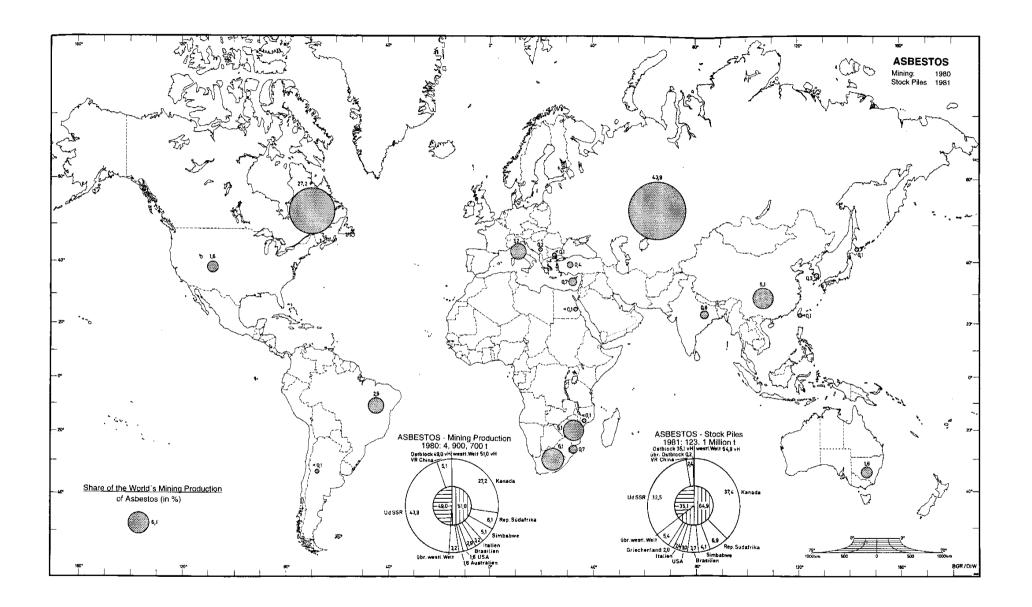
http://www.amicidelmicroscopio.it/vetrino.php

APPENDICE

ALLEGATO I

Mappa mondiale della produzione mineraria

(Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbe, et al., 1996)



ALLEGATO II

Campione Monastero: fotografie a macroscopio













RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare, innanzitutto, la mia relatrice Paola Marini per avermi introdotta

nell'ambito del delicato tema che è l'amianto e per avermi dato l'opportunità di maturare

un'esperienza di laboratorio fondamentale per una crescita professionale.

Un sentito ringraziamento è rivolto alla correlatrice Giovanna Zanetti che mi ha seguita,

aiutata e insegnato con infinita pazienza e grande disponibilità durante tutto il lavoro di

tesi, e al correlatore Oliviero Baietto che ha sempre messo a disposizione il suo tempo e le

sue conoscenze per aiutarmi.

Ringrazio inoltre il dott. Claudio De Regibus per la disponibilità fornitami. Lorena,

Fiorenza e Chiara, per il sostegno e l'avermi fatta sentire integrata con il gruppo.

Desidero inoltre ringraziare i miei genitori, che sono il mio punto di riferimento e che mi

hanno permesso di percorre e concludere questo percorso, sostenendomi nelle mie scelte

ed aiutandomi a superare i problemi incontrati. Vorrei che questo mio traguardo, per

quanto possibile, fosse un premio anche per loro e per i sacrifici che hanno fatto.

Infine, desidero ringraziare una persona speciale, Domenico, per essere stato in tutti

questi anni il mio punto di forza.

Torino, 26 marzo.

147