UNIVERSITÀ DEL PIEMONTE ORIENTALE

DIPARTIMENTO DI SCIENZE E INNOVAZIONE TECNOLOGICA

Corso di Laurea Magistrale in

Biologia Agro-Ambientale

PROVA FINALE

Caratterizzazione qualitativa e tecnologica di varietà storiche di frumento tenero costituite dall'Istituto Strampelli di Lonigo

Firmato digitalmente da Valeria Todeschini
Data: 07.10.2026 19:02:26 CEST
Organizzazione: UNIVERSITA' DEGLI STUDI DEL PIEMONTE ORIENTALE/01943490027

Relatrice: Prof.ssa Valeria Todeschini

Correlatrice: Dott.ssa Patrizia Vaccino

Tirocinio svolto presso: CREA-CI – Vercelli

Patrizia
Vaccino
07.10.2026
19:15:46
GMT+02:00

Candidata:

Giusy Romano

Matricola: 20064302

Giusy Romano

Anno accademico 2025 – 2026

INDICE

1 INTRODUZIONE 5

1.1 Origine ed evoluzione del frumento tenero 5

1.1.1 Coltivazione e domesticazione 6

1.1.2 Origine dei frumenti poliploidi 10

1.2 Morfologia 13

1.2.1 Ciclo vitale 18

1.3 Struttura della cariosside 21

1.4 Composizione della cariosside 24

1.4.1 Carboidrati 25

1.4.2 Vitamine e minerali 26

1.4.3 Proteine 27

1.5 Qualità tecnologica 32

1.5.1 Classificazione merceologica 35

1.5.2 Macinazione 37

1.5.3 Analisi tecnologiche semplici 39

1.5.4 Analisi tecnologiche complesse 41

1.6 Grani storici 46

2 SCOPO DELLA TESI 49

3 MATERIALI E METODI 51

3.1 Materiale vegetale 51

3.1.1 Condizioni agronomiche e climatiche di coltivazione 53

3.1.2 Flusso delle analisi 54

3.2 Analisi fisiche semplici 55

3.2.1 Peso di mille semi 55

3.2.2 Macinazione integrale 55

3.2.3 Falling Number 56
3.2.4 Volume di sedimentazione in SDS 57
3.2.5 Analisi composizionali (NIR): contenuto proteico e parametri qualitativi dello sfarinato integrale 59
3.3 Analisi tecnologiche complesse 60
3.3.1 Determinazione dell'umidità e condizionamento 60
3.3.2 Macinazione raffinata 62
3.3.3 Resa di macinazione 63
3.3.4 Analisi composizionali (NIR): contenuto proteico e parametri qualitativi della farina raffinata 63
3.3.5 Analisi reologiche: alveografo e farinografo 63
3.4 Analisi statistica 71
4 RISULTATI E DISCUSSIONE 72
4.1 Caratterizzazione qualitativa 72
4.2 Analisi tecnologiche semplici 72
4.2.1 Peso di mille semi (Thousand Kernel Weight, TKW) 72
4.2.2 Hardness 74
4.2.3 Contenuto proteico 75
4.2.4 Volume di sedimentazione in SDS 77
4.2.5 Falling Number 79
4.3 Analisi tecnologiche complesse 81
4.3.1 Farinografo di Brabender 81
4.3.2 Alveografo di Chopin 85
4.4 Resa della macinazione 88
4.5 Classificazione delle varietà storiche secondo l'Indice Sintetico di Qualità (ISQ) 90

6 CONCLUSIONI 94

7 BIBLIOGRAFIA 96

8 ALLEGATI 119

1 INTRODUZIONE

1.1 Origine ed evoluzione del frumento tenero

Il frumento è un cereale appartenente alla famiglia delle Poaceae (Gramineae), considerata la famiglia di piante più importante per l'economia e per l'alimentazione. Questa famiglia contiene più di 11.500 specie, divise in circa 780 generi, e domina gran parte della Terra, dalle praterie temperate alle savane tropicali (Figura 1.1) (Soreng et al., 2017). La sopravvivenza e diffusione di questa famiglia sono dovute alla grande capacità di diversificazione sviluppatasi con il passare del tempo alla fine del Cretaceo (Kellogg, 2001): tra l'Oligocene e il Miocene diverse sottofamiglie hanno sviluppato indipendentemente la fotosintesi C4, mentre altre, come quella delle Pooideae, alla quale appartiene il frumento, hanno mantenuto la fotosintesi C3. Entrambi i gruppi hanno inoltre sviluppato una forte tolleranza al pascolo e ai cambiamenti climatici: questi adattamenti hanno permesso alle Poaceae di colonizzare tutti i continenti (Vicentini et al., 2008).

Tra le Poaceae che hanno tratto vantaggio da questo successo evolutivo ci sono i cereali, che producono semi ricchi di amido e che, ad oggi, rappresentano una componente fondamentale nell'alimentazione umana. Il frumento (*Triticum ssp*), il riso (*Oryza sativa* L.) e il mais (*Zea mays* L.) rappresentano la base dell'alimentazione globale, coprendo da soli oltre la metà del fabbisogno calorico di origine vegetale. , Tuttavia, anche orzo, sorgo, miglio, avena e segale, i cosiddetti "cereali minori" sono colture di grande rilevanza (Awika, 2011).

Sul piano sistematico, il frumento appartiene alla sottofamiglia Pooideae, la più ricca di specie tra le sottofamiglie delle Poaceae. Questa sottofamiglia contiene la maggior parte dei cereali delle regioni temperate e, più precisamente, comprende la tribù Triticeae. Nella tribù Triticeae troviamo i generi: *Triticum* (frumento), *Hordeum* (orzo), *Secale* (segale) e *Aegilops* (Soreng et al., 2017). Quest'ultimo è molto importante nella storia evolutiva del frumento, avendo fornito, attraverso numerosi incroci interspecifici, i genomi che hanno dato origine alle specie poliploidi coltivate. Le graminacee, e i cereali in particolare, hanno avuto una delle relazioni più lunghe e

reciproche con l'uomo. Per questo motivo la domesticazione dei cereali è spesso vista come il punto di partenza delle civiltà agricole (Schaal, 2019).

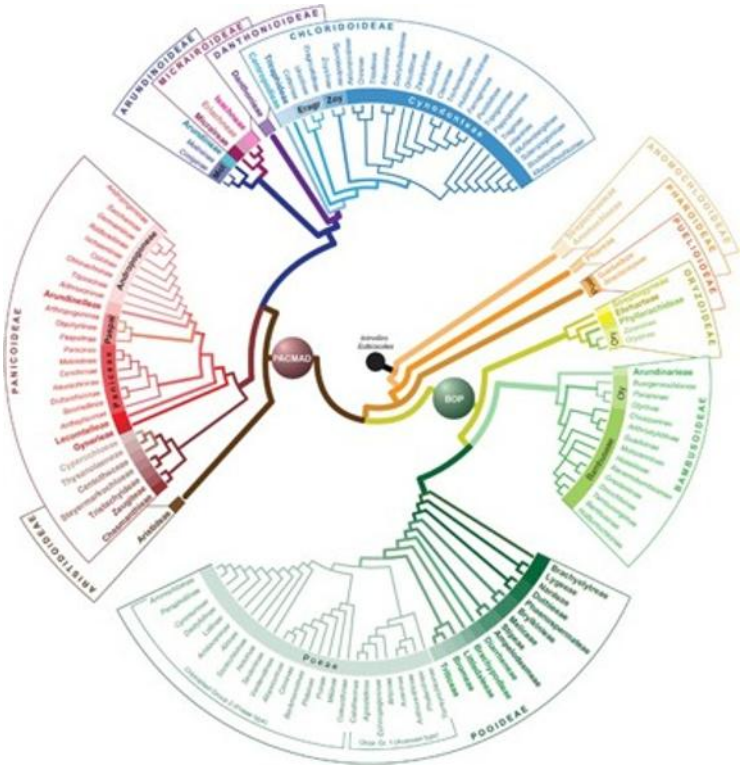

Figura 1.1 - Classificazione filogenetica della famiglia delle Poaceae, con i due grandi cladi BOP e PACMAD e le dodici sottofamiglie. Il frumento appartiene alla sottofamiglia Pooideae, tribù Triticeae. Adattata da Soreng et al. (2017), Journal of Systematics and Evolution

1.1.1 Coltivazione e domesticazione

La coltivazione e domesticazione del frumento sono strettamente legate agli sforzi dell'uomo per proteggersi dalla fame e acquisire il controllo sulle proprie risorse alimentari. Il frumento è coltivato in tutto il mondo ed è diventato la principale una delle principali fonti di nutrimento. Per secoli, il grano tenero (*Triticum aestivum*) e il grano duro (*Triticum durum*) sono stati coltivati in Occidente per fornire all'uomo energia e nutrienti essenziali. Oggi, Cina e India sono i due principali paesi produttori di grano, soprattutto perché il grano ha il vantaggio di richiedere meno acqua per la coltivazione rispetto ad altre colture simili. Per oltre un secolo, i selezionatori hanno continuamente migliorato geneticamente il grano, concentrandosi sui fattori che influenzano la resa e, più recentemente, la qualità tecnologica, intesa come l'insieme delle proprietà reologiche e panificatorie della farina (contenuto proteico, forza e

tenacità del glutine, comportamento in fase di impastamento). Le caratteristiche del frumento, che lo rendono ideale per la trasformazione in diversi prodotti alimentari, sono state notevolmente migliorate a partire dagli anni sessanta, grazie a numerose ricerche sulle proteine di riserva che costituiscono il glutine (Igrejas & Branlard, 2020).

Il frumento rappresenta una delle colture fondatrici della rivoluzione agricola avvenuta circa 10.000 anni fa nell'area della Mezzaluna Fertile, durante la rivoluzione neolitica che portò alla sua domesticazione (Haas et al., 2019). La Mezzaluna Fertile è un'ampia zona a forma di arco che parte dal "Levante" mediterraneo, attraversa la Mesopotamia settentrionale con i fiumi Tigri ed Eufrate, fino ad arrivare ai rilievi pedemontani dello Zagros e dell'Anatolia sud-orientale. Include anche le aree vicine della Transcaucasia e dell'Iran settentrionale (Figura 1.2). In questa zona, dove ha avuto luogo la domesticazione, si trovano tuttora come specie selvatiche i progenitori delle principali colture dette "*founder crops*": frumento, orzo, lenticchia, cece, pisello e lino (Zohary Daniel et al., 2012). Cereali come l'avena e la segale, invece, sono apparsi successivamente attraverso un processo di domesticazione secondaria, poiché queste colture sono nate come piante infestanti nei campi di frumento e orzo, per poi trasformarsi in colture vere e proprie (Kamal et al., 2022; Schreiber et al., 2021).

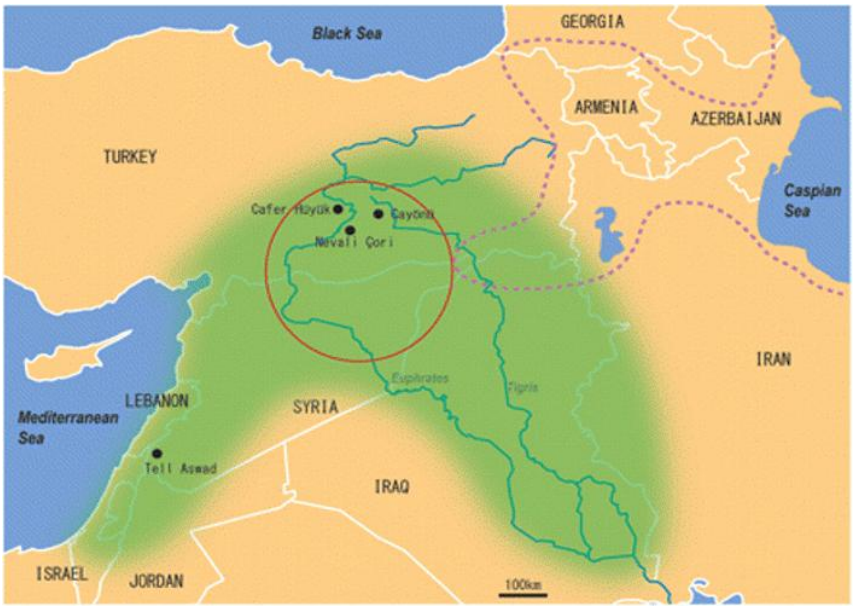

Figura 1.2 **-** Mappa del Vicino Oriente con la Mezzaluna Fertile (ombreggiata in verde) Il cerchio rosso indica l'area del Karacadag in cui si ritiene sia nata l'agricoltura; la linea tratteggiata delimita la regione occidentale dell'areale naturale di *Aegilops tauschii*, dove si presume sia avvenuta la speciazione allopoliploide di *Triticum aestivum*. Adattata da Matsuoka (2011), Plant and Cell Physiology.

Il primo frumento a essere domesticato fu il *Triticum monococcum*, o farro piccolo, una specie diploide che ha segnato l'inizio dell'agricoltura basata sui cereali e ad oggi rimane il più antico grano coltivato (Ahmed et al., 2023). Solo successivamente, insieme al monococco furono domesticati il farro dicocco (*T. dicoccum*) e, più tardi, il farro spelta (*T. spelta*). Questi frumenti vestiti, cioè aventi cariossidi che restavano strettamente avvolte dalle glumette anche dopo la trebbiatura, sono stati una fonte fondamentale di alimentazione delle prime civiltà della Mezzaluna Fertile, molto prima di essere sostituiti dai frumenti nudi (*free-threshing*), che risultano più facili da lavorare (Arzani & Ashraf, 2017). Tanto le forme selvatiche quanto quelle domesticate mostrano spighe assai diverse, dai progenitori diploidi con rachide fragile alle forme poliploidi coltivate con spiga tenace. Il paragone tra queste forme evidenzia l'evoluzione controllata durante la domesticazione (Figura 1.3) (Feuillet et al., 2008).

Figura 1.3 - Spighe di forme selvatiche e domesticate di frumento. Specie diploidi selvatiche ancestrali correlate ai frumenti tetraploidi ed esaploidi: (i) *Triticum urartu* (genoma A^uA^u), (ii) *Aegilops speltoides* (SS), (iii) *Aegilops tauschii* (DD), (iv) frumento diploide coltivato *T. monococcum* (A^mA^m). Forme selvatiche e domesticate del frumento tetraploide: (v) *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides* (AABB) e (vi) *Triticum turgidum* ssp. durum (AABB). (vii) *Triticum aestivum* (frumento tenero, AABBDD), originatosi dall'ibridazione tra la specie tetraploide domesticata *T. turgidum ssp. dicoccum* e la specie diploide selvatica *Aegilops tauschii*. Le costituzioni genomiche sono indicate tra parentesi accanto al nome di ciascuna specie. Adattata da Feuillet et al. (2008), Trends in Genetics.

Con l'inizio dell'agricoltura nel periodo neolitico, la domesticazione delle piante è stata il punto determinante che ha gettato le basi dello sviluppo della civilizzazione umana (Peng et al., 2011). Alcune di queste specie domesticate, tra cui riso, frumento e mais, come già anticipato, sono alimenti fondamentali della piramide alimentare della maggior parte della popolazione mondiale. Proprio per questa grande importanza e per la grande quantità di dati genetici attualmente disponibili, il grano è considerato un organismo modello di riferimento per la teoria evolutiva della speciazione

allopoliploide, dell'adattamento e della domesticazione delle piante (Gustafson et al., 2009; Peng et al., 2011).

La domesticazione del frumento non fu un evento unico di per sé, bensì un processo evolutivo continuo in cui l'uomo è stato attore principale, mentre l'ibridazione naturale e la speciazione allopoliploide hanno agito come processi evolutivi concomitanti. Questo percorso fu favorito dall'interazione tra fattori genetici ed ecologici (Matsuoka, 2011). Tale processo ebbe inizio con la domesticazione del farro dicocco tetraploide, e fu seguito da successivi eventi di ibridazione naturale e speciazione allopoliploide, fino ad arrivare al grano tenero, esaploide, oggetto del presente lavoro (Matsuoka, 2011). Nel corso della domesticazione, la selezione operata dall'uomo favorì caratteri fenotipici e genotipici vantaggiosi per la coltivazione e l'utilizzo della specie, eliminando progressivamente quelli utili principalmente alla sopravvivenza in ambiente naturale. L'insieme di queste modificazioni distingue le forme coltivate dai rispettivi progenitori selvatici ed è comunemente definito "sindrome della domesticazione" (Peng et al., 2011).

Tra le caratteristiche di questa domesticazione troviamo la perdita della disarticolazione del rachide. Nelle forme selvatiche, infatti, la spiga si frammenta spontaneamente a maturazione, favorendo la dispersione delle cariossidi; nelle forme domesticate, invece, il rachide rimane integro, così che la granella rimanga sulla spiga fino alla raccolta. Un'altra caratteristica selezionata durante la domesticazione è la presenza della cariosside nuda, che facilita l'utilizzo diretto del prodotto poiché non richiede la rimozione delle glume prima della trasformazione o del consumo (Haas et al., 2019).

L'evoluzione della domesticazione è tuttora oggetto di dibattito tra due modelli che si contrappongono: quello dell'evento unico e centralizzato (*core area-one event*), che descrive una domesticazione rapida, consapevole e geograficamente circoscritta, e quello protratto e non centralizzato (*protracted-autonomous*), che la interpreta come un processo diffuso e durato millenni, basato su dinamiche selettive inconsapevoli (Peleg et al., 2022). Recenti studi genomici hanno ridimensionato alcune evidenze archeobotaniche a favore del secondo modello, mostrando che i fenotipi *shattering* e *non-shattering* possono derivare dallo stesso genotipo: una singola mutazione in uno

dei due geni *Btr* (*Brittle rachis*) produce infatti spighe a fragilità dimezzata, con la porzione superiore della spiga ancora fragile e quella inferiore non fragile. Poiché la proporzione di resti fragili e non fragili nei reperti archeobotanici non riflette quindi in modo affidabile l'assetto genetico della popolazione campionata, questi risultati chiedono pertanto di rivedere il concetto di sindrome della domesticazione (Peleg et al., 2022).

Dal punto di vista sistematico, il genere *Triticum* comprende sei specie, che si differenziano per corredo genetico e livello di ploidia (Tabella 1.1). Queste specie sono raggruppate in tre sezioni: la sezione *Monococcon*, che riunisce le specie diploidi; la sezione *Dicoccoidea*, comprendente le specie tetraploidi; e la sezione *Triticum*, costituita dalle specie esaploidi (Matsuoka, 2011).

Tabella 1.1.

Classificazione del genere *Triticum*: specie, sezioni e costituzione genomica. Adattata da Matsuoka (2011), Plant and Cell Physiology.

Sezione	Specie	Genoma	Ploidia
Monococcon	*Triticum monococcum* L.	AA	Diploide (2n = 2x = 14)
Monococcon	*Triticum urartu* Tumanian ex Gandilyan.	AA	Diploide (2n = 2x = 14)
Dicoccoidea	*Triticum turgidum* L.	AABB	Tetraploide (2n = 4x = 28)
Dicoccoidea	*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk.	AAGG	Tetraploide (2n = 4x = 28)
Triticum	*Triticum aestivum* L.	AABBDD	Esaploide (2n = 6x = 42)
Triticum	*Triticum zhukovskyi* Menabde & Ericz.	AAAAGG	Esaploide (2n = 6x = 42)

1.1.2 Origine dei frumenti poliploidi

Come già accennato precedentemente, l'evoluzione dei frumenti poliploidi si inserisce nel processo avviato con la domesticazione del farro dicocco tetraploide (Matsuoka, 2011). Uno dei due eventi di allopoliploidizzazione (Figura 1.4), accaduto non più di 0,5 milioni di anni fa, è stato l'ibridazione, o incrocio, tra *T. urartu*, donatore del genoma A, e una specie diploide del gruppo Sitopsis di *Aegilops*, donatrice del genoma

B, la cui identità finora non si conosce con certezza; ad oggi la specie più vicina al donatore del genoma B è *Ae. speltoides* (genoma S) (Haas et al., 2019). Successivamente a questo incrocio è avvenuto il raddoppiamento cromosomico, che diede origine al ceppo tetraploide (genoma AABB), al quale appartengono la specie selvatica *T. turgidum* ssp. *dicoccoides*, la sua forma domesticata (*T. turgidum* ssp. *dicoccum*) e, attraverso la selezione delle forme a spiga nuda, il frumento duro (*T. turgidum* ssp. *durum*), che ad oggi è una delle due grandi specie coltivate, destinata prevalentemente alla pastificazione (Levy & Feldman, 2022).

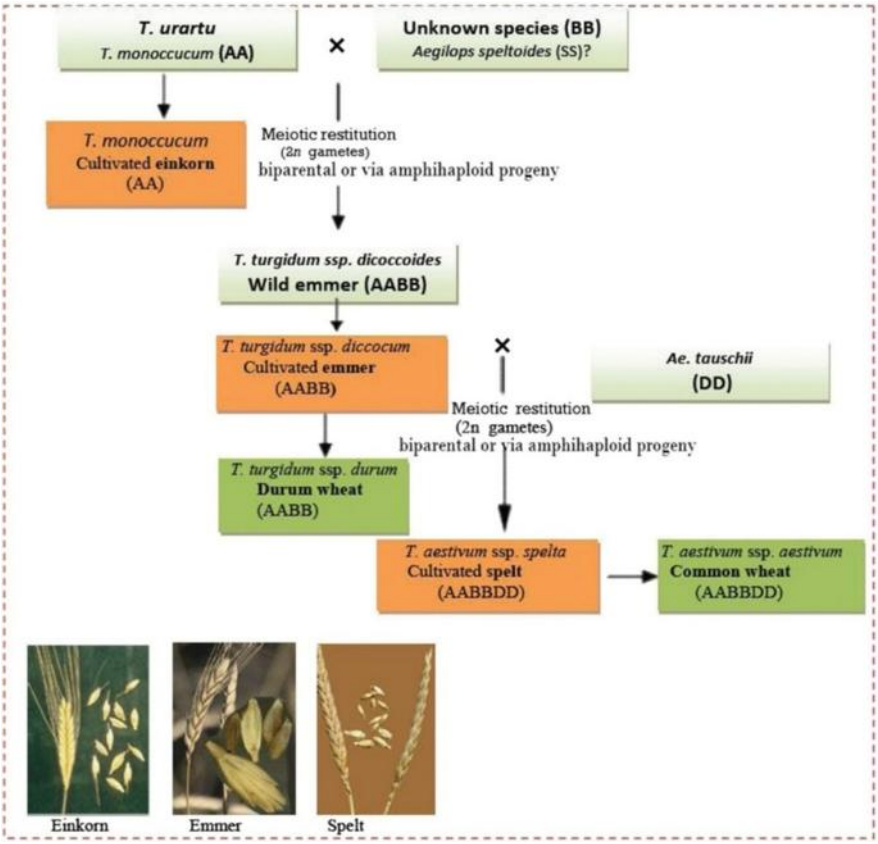

Figura 1.4 - Filogenesi delle specie domesticate del genere Triticum (farro monococco, farro dicocco, farro spelta, frumento duro e frumento tenero). Adattata da Arzani & Ashraf (2017), Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.

Il secondo evento di allopoliploidizzazione è accaduto circa 8.500-9.000 anni fa, quando l'incrocio tra un progenitore tetraploide domesticato a spiga nuda e *Ae. tauschii* (la specie selvatica diploide donatrice del genoma D), seguito da speciazione allopoliploide, originò il frumento tenero esaploide (*T. aestivum*, genoma AABBDD, 2n = 6x = 42) (Levy & Feldman, 2022). L'acquisizione del genoma D non proviene da una sola popolazione, bensì da diverse sottopopolazioni di *Ae. tauschii* geneticamente

e geograficamente distinte. Questo spiega quanto l'evoluzione del frumento sia stata un processo lungo e complesso (Wang et al., 2022; Cavalet-Giorsa et al., 2024).

L'allopoliploidia ha generato un frumento esaploide con una grande capacità adattativa. Questo ha accelerato il presentarsi di nuova variabilità genetica, grazie all'acquisizione di nuovi caratteri, nuove interazioni tra i genomi e una maggiore capacità di mitigare gli effetti delle mutazioni. Inoltre, questa allopoliploidia ha generato un frumento con una cariosside di eccellente qualità, grande, nutriente e dotata di elevata attitudine panificatoria. Queste caratteristiche hanno permesso al frumento di espandersi rapidamente, oltrepassando frontiere ancestrali e diventando uno dei principali alimenti dell'umanità (Levy & Feldman, 2022).

Nonostante i grandissimi vantaggi acquisiti con questa condizione di allopoliploidia, la presenza di tre genomi diploidi A, B e D, distinti ma evolutivamente correlati (detti omeologhi), caratterizzati da un elevato grado di sintenia, ovvero da un ordine di geni altamente conservato tra loro, espone il frumento esaploide a un grande rischio di appaiamento omeologo durante la meiosi. Tale evento è impedito da un sofisticato meccanismo di controllo genetico dell'appaiamento cromosomico, esercitato principalmente dal locus *Ph1* (*Pairing homoeologous 1*), localizzato sul braccio lungo del cromosoma 5B e supportato nella sua azione dal locus *Ph2*. Questi due loci impediscono l'appaiamento tra cromosomi omeologhi, restringendolo ai soli omologhi propriamente detti. Tale meccanismo garantisce la stabilità cariotipica e la piena fertilità del frumento esaploide (Sears, 1976).

Infine, la domesticazione del frumento ha consentito un miglioramento genetico ed un aumento della resa produttiva, ma ha fatto sì che, durante il lungo processo di poliploidizzazione, si siano persi numerosi geni e alleli presenti nei progenitori selvatici (Rahman et al., 2020). È per questo che le specie selvatiche affini e i frumenti storici costituiscono preziosi serbatoi di variabilità genetica, custodi di caratteri e alleli utili, in particolare per la resistenza agli stress biotici e abiotici e per la qualità nutrizionale, che non sono stati incorporati nel germoplasma moderno e che rappresentano una risorsa fondamentale per il miglioramento genetico e per la sicurezza alimentare in uno scenario di cambiamento climatico (Arzani & Ashraf, 2017; Cavalet-Giorsa et al., 2024).

1.2 Morfologia

Dal punto di vista morfologico la pianta adulta del frumento è divisa in due parti principali: un apparato ipogeo, costituito dalle radici, e un apparato epigeo, che comprende il culmo, le foglie e la spiga (Kirby, 2002).

Radici: sono di tipo fascicolato disposte a raggiera intorno alla base del fusto e possono arrivare fino a circa 70-80 cm di profondità nel terreno. Durante lo sviluppo e la crescita della pianta si distinguono due tipi di radici. Le radici seminali (o primarie), che vengono emesse alla nascita, si compongono di una piccola radice principale divisa in due paia di radici secondarie; esse costituiscono i principali organi assorbenti nelle prime fasi di sviluppo della pianta e ne sostengono la crescita fino allo sviluppo dell'apparato radicale definitivo. Le radici avventizie (o nodali), invece, si sviluppano successivamente dai nodi basali del culmo, in corrispondenza dell'accestimento, e diventano progressivamente preponderanti rispetto alle seminali, garantendo le funzioni principali nutrizione e di ancoraggio al suolo. L'architettura e l'estensione dell'apparato radicale non sono caratteri costanti, ma risultano fortemente influenzati dal genotipo e dalle condizioni pedoclimatiche, quali natura del terreno, disponibilità idrica ed epoca di semina, con importanti ricadute sulla capacità della pianta di esplorare il suolo e di acquisire acqua e nutrienti (Figura 1.5) (Kirby, 2002).

Figura 1.5 - Parte superiore dell'apparato radicale di una pianta di frumento: (1) vista laterale; (2) vista dal basso(Angelini, 2007).

Culmo: è la struttura portante della pianta a forma di cilindro eretto, costituito dall'alternanza di nodi e internodi (Figura 1.6). I nodi sono pieni di tessuto spugnoso

e spessi, mentre gli internodi sono generalmente cavi. Il culmo è formato da: epidermide, ipoderma, tessuto assimilativo, parenchima basale e fasci fibrovascolari. Una delle proprietà distintive del frumento, comune alle Poaceae, è la capacità di accestimento (*tillering*), per cui alla base dei nodi basali dell'asse principale nascono nuovi germogli laterali, chiamati culmi di accestimento, capaci di differenziarsi in una spiga. Il numero di culmi fertili che una pianta porta a maturità è una delle chiavi della resa. Questo fenomeno è regolato da diversi fattori come la densità della semina, il genotipo e le condizioni ambientali (Kirby, 2002). L'altezza del culmo può variare a seconda delle varietà del frumento. I frumenti storici sono molto alti, possono arrivare fino a 1,5-2,0 m, mentre le varietà moderne, portatrici di geni di nanismo (*dwarfing genes*), hanno culmi più corti, circa 60-90 cm, e risultano meno esposte all'allettamento, che può essere causato per delle condizioni ambientali avverse o da carenze nutrizionali, che si traduce in rilevanti perdite di produzione e di qualità (Peng et al., 1999).

Figura 1.6 - Composizione del fusto e delle foglie di frumento (Angelini, 2007).

Foglie: le foglie del frumento si presentano generalmente di colore verde quando la pianta è giovane e sono formate da due parti: una porzione inferiore che ha origine a

livello del nodo e inguaina il fusto (motivo per cui viene definita guaina), e una seconda porzione superiore che, al contrario, è libera, con una struttura a forma di nastro e con nervature parallele, ed è chiamata lamina. La lamina è la sede principale dove si ha attività fotosintetica. Nel punto dove la lamina e la guaina convergono si trovano una piccola lingua chiamata ligula e due estroflessioni, che si originano dalla lamina, chiamate auricole o orecchiette (Figura 1.7). La ligula limita la penetrazione dell'acqua piovana all'interno della guaina e riduce l'attrito tra la lamina e il culmo. Invece, le auricole avvolgono il culmo e aiutano la guaina ad esercitare l'azione di ancoraggio della lamina al fusto (Kirby, 2002; Angelini, 2007).

Figura 1.7 - Elementi principali della foglia di frumento (Angelini, 2007).

Spiga: è formata da un asse centrale chiamato rachide, in cui sono inserite in forma alternata (a zig-zag) delle spighette, che sono le unità riproduttive della spiga. Queste spighette sono presenti in un numero che può variare da 20 a 30 per spiga. La spiga presenta anche un asse secondario chiamato rachilla, la quale, insieme al rachide è divisa in nodi e internodi (Figura 1.8). La spiga cresce dal basso verso l'alto in senso acropeto con la formazione progressiva dei primordi delle spighette. Il numero di primordi formati durante questa fase determinerà quante spighette avrà potenzialmente la spiga (McMaster, 1997).

Alla base di ogni spighetta troviamo due piccole foglioline modificate sterili chiamate glume. Dentro le glume si trovano i veri e propri fiori della spighetta chiamati fioretti

che sono presenti in numero variabile e che sono attaccati proprio alla sua rachilla (Angelini, 2007). Quanti più fioretti sono presenti in ogni spighetta, tanto maggiore sarà il numero di cariossidi (chicchi) che si otterranno, e questo si traduce in una resa più alta del campo di grano (Kellogg, 2015).

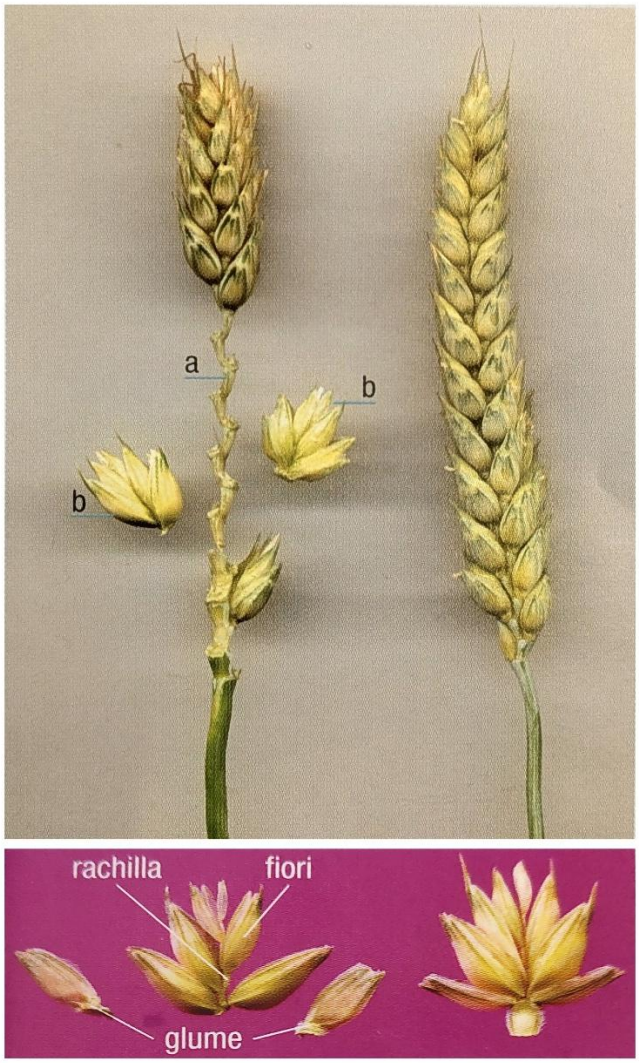

Figura 1.8 - Sopra: composizione di una spiga di grano tenero (a) rachide; b) spighetta). Sotto: composizione di una spighetta (Angelini, 2007).

Ogni fiore (o fioretto) del frumento (Figura 1.9) è racchiuso tra due brattee, il lemma inferiore e la palea superiore, che racchiudono al loro interno le lodicole e le strutture sessuali del fiore: l'androceo e il gineceo. L'androceo è l'apparato maschile del fiore, ed è costituito da tre stami, ciascuno formato da un sottile filamento che sostiene l'antera, biloculare, deputata alla produzione e al rilascio di abbondante polline. D'altro canto, il gineceo rappresenta l'apparato femminile ed è monocarpellare, ovvero presenta una microscopica fogliolina trasformata, denominata carpello, con una parte basale

chiamata ovario uniloculare sormontata da un'appendice bifida piumosa denominata stimma, la cui struttura favorisce l'adesione e la ritenzione dei granuli pollinici (Angelini, 2007; Kellogg, 2015).

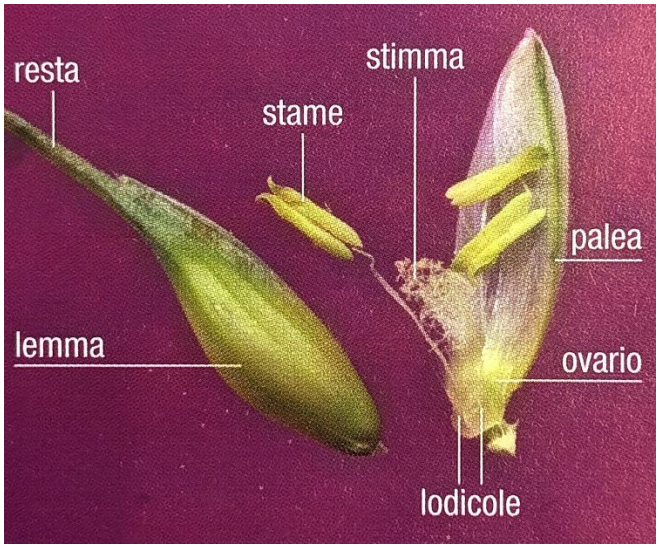

Figura 1.9 – Componenti principali del fiore(Angelini, 2007).

Formazione del frutto: la formazione del frutto avviene direttamente all'interno dell'ovario, dove si vede la presenza di un solo ovulo. Dopo la fecondazione da parte del polline, l'ovulo va incontro a una serie di trasformazioni che lo fanno diventare seme: i suoi tegumenti si trasformano nel tegumento seminale che lo riveste. Nel frattempo, la parete dell'ovario che racchiude il seme si sviluppa a sua volta, diventando un frutto: nel frumento questo tessuto, che proviene dalla parete dell'ovario è chiamato pericarpo. Questa fusione tra pericarpo e tegumento seminale forma la cariosside (Kirby, 2002).

Cariosside: la cariosside così formata costituisce il prodotto di interesse agronomico e tecnologico del frumento, in quanto sede di accumulo delle sostanze di riserva e materia prima per la produzione di sfarinati. La sua organizzazione istologica e la sua composizione, sono i fattori che determinano le proprietà molitorie e panificatorie (Delcour & Hoseney, 2010).

1.2.1 Ciclo vitale

Il ciclo vitale del frumento si compie interamente nell'arco di una singola stagione vegetativa e si articola in una successione ordinata di fasi fenologiche, che sono regolate dall'interazione tra il genotipo della pianta e i fattori ambientali (temperatura e fotoperiodo). Queste fasi fenologiche comprendo rispettivamente 1) la fase vegetativa, che include germinazione, emergenza, accestimento e levata, durante la quale la pianta sviluppa i propri organi ed espande l'apparato fogliare, 2) la successiva fase riproduttiva, che include spigatura, fioritura e maturazione, terminando con la formazione e il riempimento della cariosside. Il periodo di semina del grano può avvenire tra l'autunno e la primavera, e questo può variare a seconda della latitudine e delle condizioni climatiche locali (Hyles et al., 2020). In aree geografiche con clima mite (es. Italia), la semina avviene in autunno, mentre nelle regioni dove gli inverni sono più rigidi, si preferisce seminare in primavera (Braun & Săulescu, 2002). Per la descrizione di queste fasi, la comunità scientifica adotta scale fenologiche codificate, come la scala di Feekes e la scala decimale di Zadoks (Figura 1.10), che consentono un riferimento preciso tanto nella ricerca quanto nella pratica agronomica (Hyles et al., 2020).

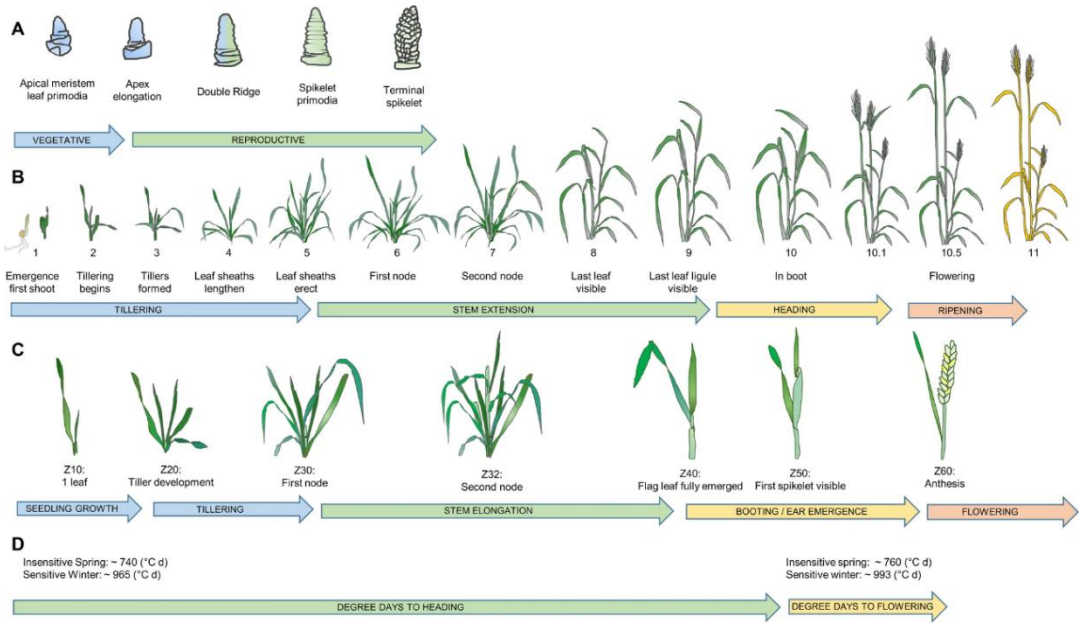

Figura 1.10 - Fasi di sviluppo del frumento. (a) Morfologia dell'apice dalla fase vegetativa a quella riproduttiva (Moncur, 1981); (b) scala di Feekes (stadi 1-11) (Feekes, 1941; Large, 1954); (c) scala decimale di Zadoks (punteggio 0-100) (Zadoks et al., 1974); (d) esempio di gradi-giorno cumulati dall'emergenza alla spigatura e dall'emergenza alla fioritura per linee quasi isogeniche con diverse esigenze di vernalizzazione o fotoperiodo (Bloomfield et al., 2018). Riprodotta da Hyles et al. (2020), Heredity.

Germinazione ed emergenza: la germinazione avviene a temperature sopra lo zero, con temperature che possono oscillare tra 3 e 4 °C, in un terreno con idonee condizioni di umidità e aerazione. Durante questa fase, il chicco di grano assorbe l'umidità del terreno e si rigonfia. In questo momento l'embrione inizia a crescere, grazie alla mobilitazione delle sostanze nutritive di riserva dell'endosperma, che attraverso lo scutello vengono trasferite all'embrione in seguito all'attivazione di specifici segnali molecolari. Durante questa fase succede la fuoriuscita del coleottile, guaina protettiva caratteristica delle Poaceae, e si sviluppa la prima radichetta, a cui fa seguito la formazione delle prime radici seminali. A seguito della rottura del coleottile, le prime foglie vengono esposte alla luce (emergenza) e hanno inizio l'attività fotosintetica, per reperire le sostanze nutritive, e la respirazione, per ricavare energia da impiegare nella crescita (Kirby, 2002; Zadoks et al., 1974). Quindi, è necessario programmare molto bene il periodo di semina, onde evitare che la fase di emergenza coincida con i periodi più freddi della stagione, in quanto a temperature di 0 °C ogni attività vegetativa della plantula risulta sospesa (Pasqua et al., 2015).

Accestimento: questa fase è caratterizzata dalla produzione di nuovi germogli, chiamati culmi secondari, che produrranno nuove spighe. Si svolge in un piano molto vicino alla superficie del terreno, detto "piano di accestimento", e termina con lo sviluppo del primo nodo del culmo nella porzione epigea. L'accestimento ha inizio in autunno, successivamente si arresta temporaneamente durante l'inverno, per poi riprendere in primavera, e termina con il passaggio dalla fase vegetativa a quella riproduttiva, il cosiddetto "viraggio". Se il viraggio avviene in condizioni sfavorevoli, il numero di spighette e fiori sviluppato risulterà ridotto. Si distinguono varietà autunnali, nelle quali il viraggio richiede una fase di vernalizzazione, ossia l'esposizione a basse temperature prossime a 0 °C, e varietà primaverili o alternative, nelle quali avviene senza necessità di uno stimolo termico. Il grado di accestimento dipende da alcune caratteristiche di coltivazione, quali epoca dell'anno, profondità e densità di semina, oltre che dalle condizioni ambientali (Kirby, 2002).

Levata: con l'aumento delle temperature e l'arrivo della primavera, per le piante di grano inizia la fase di levata. È una fase fenologica rapida, che si svolge a temperature propriamente primaverili, intorno ai 12-13 °C ed è caratterizzata da un'intensa attività

cellulare che richiede elevate quantità di nutrienti e acqua. Durante questa fase, i nodi ed internodi che prima erano a distanza raccorciata iniziano a distanziarsi grazie al proliferare del tessuto meristematico che è alla base di ciascuno di essi. La spiga completamente formata viene spinta in alto attraverso la guaina dell'ultima foglia, determinandovi un peculiare ingrossamento. Questo è definito lo stadio di "botticella" (Kirby et al., 1994).

Spigatura: la spigatura è caratterizzata dalla progressiva emersione della spiga: l'ultimo internodo si allunga e la spiga sale fino a fuoriuscire completamente dalla guaina di rivestimento (Kirby, 2002)

Fioritura: successivamente alla spigatura, avviene la fase di impollinazione, dove le lodicole del fiore assorbono acqua, si ingrossano e distanziano il lemma dalla palea, in modo che la pianta fiorisca**.** L'impollinazione è autogama, più precisamente cleistogama, ossia a fiore chiuso, con trasferimento del polline dalle antere allo stimma dello stesso fiore. Perché la fecondazione si compia correttamente occorre una temperatura di almeno 15 °C. Nell'arco di due o tre giorni si forma una spiga completa e, in buone condizioni di coltivazione, si ottengono in media da 36 a 42 cariossidi per spiga (Pasqua et al., 2015).

Maturazione: compiuta la fecondazione, l'ovario si ingrossa e si forma la cariosside, in cui vengono accumulate enormi quantità di sostanze di riserva. Il processo di maturazione avviene in distinte fasi: durante la maturazione acquosa la cariosside raggiunge la metà delle dimensioni finali, mentre nella fase di maturazione lattea le cariossidi, di colore verde e costituite da un liquido lattiginoso, completano la loro formazione. In questa fase, nelle cellule dell'endosperma di ogni cariosside si accumulano i granuli di amido e vengono depositate le proteine di riserva. Segue la maturazione cerosa: in questa fase diminuisce la concentrazione di acqua e aumentano le sostanze nutritive nella cariosside, che progressivamente subisce un ingiallimento. In questa fase qualunche stress ambientale può bloccare la migrazione di sostanze nutritive verso la cariosside; successivamente avviene la maturazione piena: la cariosside continua a perdere acqua, è completamente gialla/ambrata, di consistenza molto dura, ideale per la mietitura; infine avviene la maturazione di morte, fase in cui

si riduce il contenuto di acqua della cariosside, che si attesta intorno al 12%, e la pianta diventa secca con radici molto fragili (Kirby, 2002; Zadoks et al., 1974).

1.3 Struttura della cariosside

La cariosside viene identificata comunemente e popolarmente come seme, chicco o granella, ma botanicamente è un frutto secco monospermo, indeiscente (cioè che non si apre spontaneamente a maturità), nel quale i tessuti del pericarpo si sono fusi con quelli del tegumento seminale. Presenta una forma ovoidale, lunga circa 7,3-8,5 mm e larga circa 3,3-4,1 mm (Gegas et al., 2010), con una faccia ventrale e una dorsale. La faccia dorsale è convessa e, alla base, è presente l'embrione, mentre nell'estremità opposta è frequente trovare un ciuffo di peli (barba o *brush*). La faccia ventrale è percorsa longitudinalmente da un solco chiamato ilo (Delcour & Hoseney, 2010).

Nella cariosside matura si distinguono tre porzioni diverse per origine embriologica, struttura e destino nel processo di molitura; il tegumento esterno chiamato pericarpo va a costituire quello che comunemente conosciamo come crusca; nella parte centrale troviamo l'endosperma, ricco di amido, che costituisce il tessuto di riserva più abbondante da cui si ricava la farina; infine, l'embrione o germe che è destinato a dare origine ad una nuova pianta. Dal punto di vista ponderale, queste porzioni rappresentano indicativamente sul peso secco della cariosside il 13-17% della cariosside per il tegumento esterno, l'80-85% per l'endosperma amilaceo e il 2-3% per il germe (Barron et al., 2007; Surget & Barron, 2005).

La Figura 1.11 descrive l'organizzazione istologica della cariosside in sezione longitudinale: si può evidenziare che il tegumento esterno non è formato in realtà da un unico strato, ma comprende il pericarpo esterno, il pericarpo interno, la testa e lo strato aleuronico (sito tra il pericarpo e l'endosperma) ricco di proteine ed enzimi. Al centro della cariosside è visibile la massa dell'endosperma amilaceo e, infine, nella porzione basale troviamo l'embrione o germe (Lebert et al., 2022).

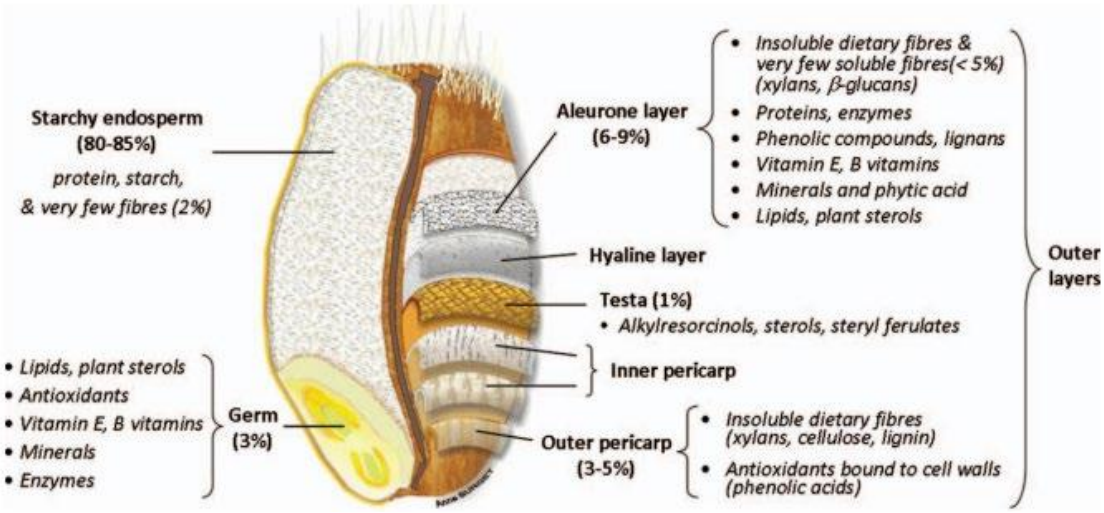

Figura 1.11 - Istologia del chicco di grano. Adattata da Surget e Barron (2005), Industries des Céréales.

Il pericarpo ha una superficie esterna liscia (Kirby, 2002) e di colore variabile a seconda delle varietà. Normalmente ha colorazione che va dal giallo paglierino al marrone-rossastro, ma possiamo trovare anche varietà in cui può raggiungere tonalità viola o blu a seconda dei pigmenti presenti a livello dei diversi strati della cariosside. Questa variabilità di colore dipende dal tipo di pigmenti che possono accumularsi nei diversi strati: gli antociani si depositano nell'aleurone o nel pericarpo, i flavonoidi li possiamo trovare negli strati più esterni della cariosside e sono quelli che conferiscono il colore giallo e rossastro, infine i carotenoidi si trovano a livello dell'endosperma e danno il colore giallo (Lachman et al., 2017). Il pericarpo è ricco di polisaccaridi strutturali della parete cellulare, quali cellulosa e arabinoxilani, oltre che di lignina; in aggiunta possiamo trovare vitamine e minerali. Svolge inoltre molteplici funzioni essenzialmente di tipo protettivo nei confronti dell'acqua, dei patogeni e degli agenti meccanici (Delcour & Hoseney, 2010). Durante le prime fasi dello sviluppo della cariosside, il pericarpo è metabolicamente attivo e accumula transitoriamente amido, che viene poi idrolizzato e accumulato nell'endosperma in accrescimento (Yu et al., 2015).

L'aleurone è formato da un unico strato di cellule cuboidali a pareti spesse, prive di granuli di amido e ricche di corpi proteici, granuli di aleurone, sali minerali, lipidi, vitamine del gruppo B e composti bioattivi ad azione antiossidante (Brouns et al.,

2012; Xiong et al., 2013; Lebert et al., 2022). È in grado di assolvere molteplici funzioni: accumulo e trasporto di nutrienti per la germinazione dei semi, decomposizione delle sostanze di riserva dell'endosperma per la crescita dell'embrione, e protezione e mantenimento dell'attività della cariosside (Lebert et al., 2022). La crusca, che raccoglie l'insieme dei tegumenti e dello strato aleuronico, rappresenta pertanto la frazione della cariosside più ricca di fibra alimentare, sali minerali e micronutrienti (Barron et al., 2007).

L'endosperma, come accennato sopra**,** costituisce la porzione più abbondante e tecnologicamente più importante della cariosside (Barron et al., 2007) ed è la frazione dalla quale si ottiene la farina a seguito del processo di macinazione. Presenta cellule specializzate che garantiscono un efficace trasporto di nutrienti fondamentali dalla pianta madre verso l'endosperma in accrescimento durante lo sviluppo della cariosside (Wang et al., 1994). Ha una consistenza farinosa ed è di colorazione generalmente biancastra nel frumento tenero, mentre nel frumento duro ha consistenza vitrea e colore giallo paglierino, dovuto alla presenza di un maggior contenuto in carotenoidi (Turnbull & Rahman, 2002; Ficco et al., 2014). Infine, l'endosperma è ricco di sostanze di riserva, in particolare amido, che ne rappresenta circa l'80% del peso secco (Shewry et al., 2013); il resto è composto da proteine, lipidi e minerali, la cui distribuzione nelle diverse frazioni presenti nella cariosside è riportata nella Tabella 1.2 (Haard, et al., 1999).

Tabella 1.2 **.**

Distribuzione di proteine, lipidi e minerali nelle frazioni della cariosside di frumento (Haard, et al., 1999).

Frazione	% sul chicco intero	Proteine (%)	Lipidi (%)	Minerali (%)
Chicco intero	100,00	12,00	2,00	2,00
Endosperma	80,00	10,00	1,20	0,60
Aleurone	8,00	18,00	8,50	15,00
Tegumento	8,50	6,00	1,00	3,50

L'amido dell'endosperma si presenta sotto forma di granuli lenticolari grandi (amido di tipo A) e granuli sferici piccoli (amido di tipo B); in determinate condizioni di

sviluppo può inoltre comparire un'ulteriore classe di granuli molto piccoli, detti di tipo C (Evers, 1973; Bechtel & Wilson, 2003). Questa distribuzione influenza le proprietà di gelatinizzazione, di assorbimento idrico e reologiche degli sfarinati, che a loro volta sono modulate dal genotipo e dalle condizioni ambientali di crescita (Rakita et al., 2023). Questi granuli di amido sono costituiti da due polimeri del glucosio: l'amilosio, costituito prevalentemente da unità di D-glucopiranosio legate da legami α-(1→4), che formano una struttura elicoidale; e l'amilopectina, che presenta una struttura ramificata con legami α-(1→6) che si verificano ogni 24-30 unità di glucosio. Nel frumento l'amido è composto indicativamente per il 25% da amilosio e per il 75% da amilopectina (Delcour & Hoseney, 2010).

L'embrione si trova nella parte più interna della cariosside e risulta ben visibile anche dalla sua porzione dorsale basale. È molto importante in quanto rappresenta l'inizio dello sviluppo di una nuova pianta. Si compone di alcuni abbozzi degli organi, sia della futura parte epigea della pianta, che è chiamata piumetta, sia delle radichette. Piumetta e radichette sono protette da due membrane che sono rispettivamente chiamate coleottile e coleoriza. Questo insieme di organi è in grado di comunicare con l'endosperma tramite lo scutello (o cotiledone, la fogliolina embrionale) che è in grado di effettuare la suzione delle sostanze nutritive durante la fase di germinazione. È particolarmente ricco di lipidi, proteine di elevato valore biologico, zuccheri solubili, vitamine (in particolare vitamina E e vitamine del gruppo B) e altre sostanze antiossidanti. La presenza di una grande quantità di lipidi fa sì che questa porzione sia suscettibile a fenomeni ossidativi e di irrancidimento, ragione per cui il germe viene generalmente allontanato in fase di macinazione al fine di prolungare la conservabilità delle farine (Delcour & Hoseney, 2010).

1.4 Composizione della cariosside

La conoscenza della composizione del chicco di grano è fondamentale per l'utilizzo tecnologico di questo cereale in diversi prodotti finali come pane, biscotti, pasta, ecc., nonché per i vari processi di lavorazione industriale e, infine, per la salute dei consumatori (Laubin et al., 2008).

Lo strato aleuronico dei semi di frumento è uno dei principali componenti della crusca, che è composta da sette strati diversi. Questo è l'unico strato esterno costituito da cellule viventi, che fornisce proteine ricche di lisina e contiene anche diverse vitamine (B1, B2, B3, B6, B9 ed E) e minerali quali fosforo, potassio, magnesio, manganese e ferro (Laubin et al., 2008); oltre ai noti benefici nutrizionali, è stato attribuito a questo strato aleuronico un effetto preventivo e protettivo nei confronti di diverse patologie, tra cui alcune forme di cancro (Harris & Ferguson, 1999; Laubin et al., 2008). Inoltre, è stato segnalato che questo strato può essere facilmente digerito, mentre la presenza di lignina impedisce la digestione degli altri strati della crusca (Harris & Ferguson, 1993).

L'acqua è presente in quantità variabile, pari a circa il 13%; valori elevati di umidità possono compromettere la conservazione della cariosside. I carboidrati rappresentano mediamente 72% del peso fresco della cariosside; tra questi l'amido è la componente tecnologicamente più importante (circa il 58%) e i polisaccaridi non amidacei (circa il 13%), risultano predominanti, seguiti dalle proteine che costituiscono mediamente l'11% del peso del chicco, lipidi (circa il 2%) e i minerali (circa il 2%) (Wieser et al., 2020), come riportato in Tabella 1.2.

1.4.1 Carboidrati

I carboidrati sono una fonte energetica fondamentale nell'alimentazione umana che forniscono un apporto energetico pari a 4 kcal/g, e coprono all'incirca il 40-75% del fabbisogno giornaliero, a seconda della popolazione considerata (FAO/WHO, 1998; Wieser et al., 2020). Costituiscono il 60-70% del chicco di frumento (Wieser et al., 2020). Come descritto precedentemente, questi carboidrati sono localizzati prevalentemente nell'endosperma sotto forma di riserva energetica rappresentata prevalentemente da amido, organizzato in granuli di diversa dimensione e forma (tipo A, B, C) (Evers, 1973; Bechtel & Wilson, 2003).

Nella cariosside, sono presenti anche zuccheri semplici come glucosio e fruttosio (< 0,1 %), saccarosio (0,5-1,6%), maltosio (0,1-0,2%) e raffinosio (0,2-0,7%). I principali oligosaccaridi si concentrano nella crusca e nell'endosperma più esterno, ma si trovano anche, in minor quantità sia nell'endosperma interno sia nel germe, e sono

rappresentati da fruttani (0,8-1,9%), carboidrati di tipo graminano costituiti da unità di fruttosio legate tramite legami β-(2→1) e β-(2→6), comunemente associati a un'unità di glucosio, con grado di polimerizzazione medio di 5-7 unità (Wieser et al., 2020).

L'amido esercita un ruolo importantissimo sia per la qualità tecnologica finale della farina sia a livello nutrizionale, visto che rappresenta la principale fonte energetica del chicco (11,4 kJ/g nella farina integrale, 13,1 kJ/g nella farina bianca), dato che viene facilmente degradato dalle amilasi in glucosio durante la digestione gastrointestinale. Inoltre, il grano integrale rappresenta una fonte di zuccheri fermentescibili, quali la fibra, l'amido resistente e alcuni oligosaccaridi. La fibra presente nella cariosside è costituita principalmente da polimeri sia solubili (pectina, gomme e mucillagine) sia insolubili (cellulosa, emicellulosa e lignina) (Delcour & Hoseney, 2010).

1.4.2 Vitamine e minerali

Le vitamine sono presenti principalmente nella crusca e nel germe, per cui le farine integrali hanno un contenuto molto più elevato rispetto alle farine bianche. Le sostanze biologicamente attive presenti nel frumento integrale ed associate ad un effetto benefico per la salute comprendono sia vitamine liposolubile (A,D,E,K) sia idrosolubili, come quelle appartenenti al gruppo B (tiamina, niacina, riboflavina, acido pantotenico) (Wieser et al., 2020). I chicchi di frumento integrale sono un'importante fonte di vitamina E, appartenente a una famiglia di otto antiossidanti liposolubili naturali chiamati tococromanoli, con due tipi di struttura: quattro denominati tocoferoli (α, β, γ e δ-tocoferolo) e gli altri quattro denominati tocotrienoli (α, β, γ e δ-tocotrienolo). A seconda delle diverse forme chimiche in cui questa vitamina può presentarsi, cambia anche l'efficacia della sua azione antiossidante, perché non tutte le forme sono fisiologicamente attive e biodisponibili (Hussain et al., 2012). È importante sottolineare anche la presenza di fattori antinutrizionali come l'acido fitico (Zhan et al., 2005) e diversi inibitori di enzimi (Wieser et al., 2020).

Il frumento integrale è inoltre un'importante fonte di minerali quali potassio, magnesio, fosforo e calcio, seguiti in quantità minori da zinco, manganese e ferro. Rame e selenio, invece, sono presenti solo in tracce (Wieser et al., 2020).

1.4.3 Proteine

Le proteine rappresentano, il secondo costituente della cariosside di frumento per abbondanza dopo l'amido, e ne determinano il valore nutrizionale e le proprietà tecnologiche. Vengono distinte in base alla loro solubilità in diversi solventi. La classificazione tradizionalmente adottata risale a Osborne, che agli inizi del Novecento le suddivise in quattro classi in base alla loro solubilità sequenziale (Osborne, 1907):

- albumine, proteine monomeriche, solubili in acqua;
- globuline, proteine monomeriche, solubili in soluzione salina;
- gliadine, proteine monomeriche, solubili in alcool;
- glutenine, solubili in soluzioni debolmente acide o basiche.

In base alla loro funzione le proteine sono raggruppate in due grandi categorie: le proteine metabolico-strutturali, che comprendono albumine e globuline, e le proteine di riserva, costituite da gliadine e glutenine, queste ultime largamente predominanti e responsabili delle proprietà uniche del frumento (Shewry & Halford, 2002).

Il contenuto proteico della cariosside è influenzato fortemente dal tipo varietale e dalle condizioni pedoclimatiche e agronomiche di coltivazione. Tra i fattori ambientali, la disponibilità di azoto riveste il ruolo importantissimo, visto che è l'elemento principale che più direttamente condiziona la sintesi proteica. Si è visto specificamente che la concimazione con azoto, soprattutto nelle fasi tardive dello sviluppo, aumenta il contenuto proteico della granella, in modo particolare, la porzione di proteine di riserva. Poiché il tenore proteico è correlato all'attitudine panificatoria (Shewry & Halford, 2002), la sua determinazione costituisce uno dei parametri fondamentali nella valutazione qualitativa dei frumenti (Shewry, 2023).

Albumine e globuline. Sono proteine di origine citoplasmatica localizzate prevalentemente nell'embrione e nello strato aleuronico, e in minori quantità nell'endosperma. Complessivamente rappresentano tra il 10 e il 22 % delle proteine totali presenti nella cariosside (Dupont & Altenbach, 2003) e sono ricche di aminoacidi essenziali, in particolare lisina, di cui forniscono il 50% presente nella cariosside, triptofano e metionina (Žilić, 2013). Il germe, ricco di lisina (Ferreira et al., 2026),

viene normalmente allontanato durante il processo di macinazione industriale insieme allo strato esterno aleuronico (Shewry & Halford, 2002). Inoltre, a questa categoria proteica appartengono numerosi enzimi coinvolti nel metabolismo dei cereali, nello sviluppo e nella risposta della cariosside agli stimoli ambientali, tra cui le alfa-amilasi, le beta-amilasi, alcuni inibitori delle alfa-amilasi e della tripsina, lipossigenasi, perossidasi, pentosanasi, xilanasi e glucosio-ossidasi (Žilić, 2013).

Gliadine e glutenine. Costituiscono le proteine di riserva dell'endosperma, rappresentano circa l'80% delle proteine totali nella cariosside e vengono depositate sotto forma di corpi proteici durante la formazione dell'endosperma. Vengono definite, nel loro complesso, prolammine per l'elevato contenuto di prolina e glutammina, e sono caratterizzate da un basso contenuto di aminoacidi essenziali, in particolare di lisina. Nella Figura 1.12 si può osservare la classificazione delle diverse classi proteiche del frumento, con le rispettive proporzioni relative e i pesi molecolari (Wieser et al., 2023).

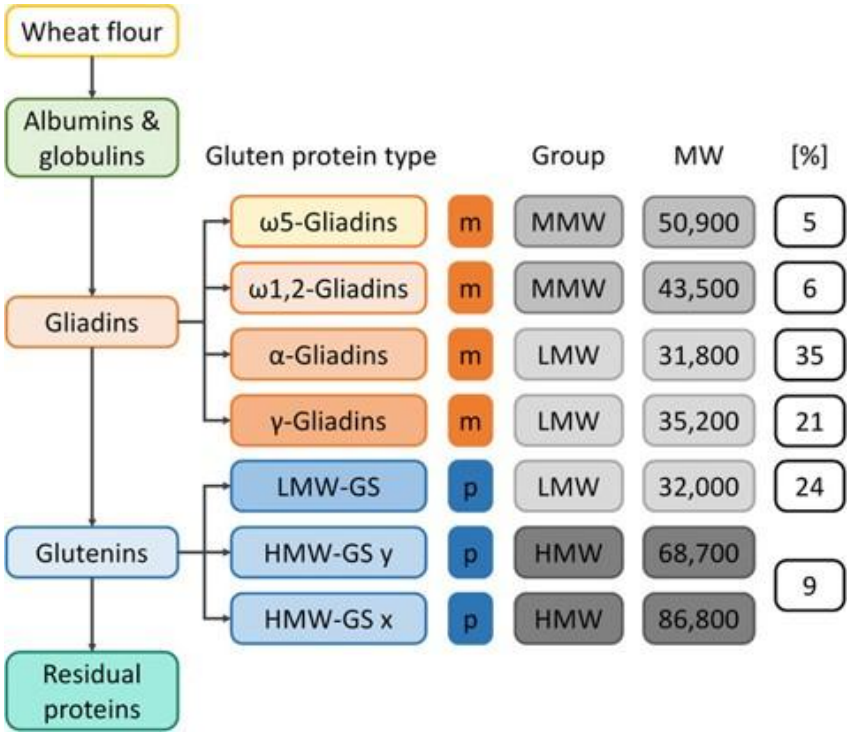

Figura 1.12 - Classificazione delle proteine del frumento nelle diverse frazioni e tipologie (albumine e globuline, gliadine e glutenine). Per le glutenine e le gliadine sono riportati il carattere monomerico (m) o polimerico (p), il gruppo di peso molecolare, il peso molecolare (MW) e la proporzione relativa (%) di ciascuna frazione rispetto al glutine totale. Adattata da Wieser et al. (2023), Cereal Chemistry.

Le gliadine sono proteine monomeriche costituite da singole catene polipeptidiche non legate covalentemente ad altre; hanno un peso molecolare compreso tra 28 e 50 kDa e costituiscono il 40% delle proteine dell'endosperma. Sono rappresentate da grandi famiglie di proteine con sequenze aminoacidiche simili, e sono state classificate in base alla loro mobilità elettroforetica decrescente in α-, β-, γ- e ω-gliadine (Wieser et al., 2023).

Le γ- e ω-gliadine sono codificate da geni situati nei loci omeologhi (*Gli-A1*, *Gli-B1* e *Gli-D1*) localizzati sul braccio corto dei cromosomi del gruppo 1. Ciascuno di questi loci contiene da tre a cinque geni codificanti per ognuno dei due gruppi di proteine; gli eventi di ricombinazione per ognuno di questi loci sono estremamente rari (Payne, 1987). I geni coinvolti nella sintesi delle gliadine α e β sono invece controllati dai loci omeologhi *Gli-A2*, *Gli-B2* e *Gli-D2*, situati sul braccio corto dei cromosomi del gruppo 6 (Payne, 1987). Ogni locus è responsabile di codificare un numero elevato di proteine diverse (Anderson & Greene, 1997; Sabelli & Shewry, 1991).

Metodi moderni, come l'elettroforesi bidimensionale o la cromatografia liquida ad alta prestazione in fase inversa (RP-HPLC), hanno consentito la separazione della frazione di gliadina in oltre cento componenti, permettendo di raggruppare le gliadine, sulla base delle loro caratteristiche strutturali, in quattro gruppi diversi: ω5-, ω1,2-, α/β- e γ-gliadine (Tabella 1.3). Le α-, β- e γ-gliadine si caratterizzano per avere un determinato numero di residui di cisteina, che permettono la formazione di legami disolfuro esclusivamente intramolecolari; le ω-gliadine, invece, presentano un alto contenuto di glutammina, prolina e fenilalanina e sono prive di cisteina, quindi incapaci di formare ponti disolfuro. Questo spiega perché le gliadine non partecipano alla polimerizzazione del glutine e vi rimangono intercalate come unità mobili, ma esercitano comunque un'azione importante nel contributo alla viscosità e all'estensibilità dell'impasto (De Santis et al., 2021).

Tabella 1.3.

Caratterizzazione dei tipi di gliadina e delle subunità gluteniniche: peso molecolare (MW, espresso in migliaia di dalton), proporzioni relative e composizione amminoacidica parziale. Gln, glutammina; Pro, prolina; Phe, fenilalanina; Tyr, tirosina; Cys, cisteina. Adattata da Wieser (2007), Food Microbiology.							
Tipo	**MW×10 $^{-3}$**	**Proporzioni (%)**	**Composizione parziale degli amminoacidi (%)**				
			Gln	**Pro**	**Phe**	**Tyr**	**Cys**
ω 5-gliadine	49–55	3-6	56	20	9	1	1
ω 1,2-gliadine	39-44	4-7	44	26	8	1	1
α / β -Gliadine	28-35	28-33	37	16	4	3	2
γ -gliadine	31-35	23-31	35	17	5	1	3
x -HMW-GS	83-88	4-9	37	13	0	6	19
y -HMW-GS	67-74	3-4	36	11	0	5	18
LMW-GS	32–39	19-25	38	13	4	1	3

Le glutenine sono invece proteine polimeriche, formate da numerose subunità unite tra di loro da legami disolfuro intermolecolari, con pesi molecolari elevati che possono oscillare tra 500.000 Da e oltre 10 milioni di dalton, per questo motivo sono definite come le proteine di maggiori dimensioni presenti in natura. La distribuzione del peso molecolare di questi polimeri rappresenta uno dei principali elementi che influenzano le proprietà dell'impasto e la qualità di panificazione. Queste subunità gluteniniche si dividono in due grandi classi in base al loro peso molecolare: subunità ad alto peso molecolare (*high molecular weight glutenin subunits*, HMW-GS) e subunità a basso peso molecolare (*low molecular weight glutenin subunits*, LMW-GS) (Wieser, 2007).

Le LMW-GS rappresentano la classe predominante, con una proporzione di circa il 20% e hanno un peso molecolare simile alle α/β- e γ-gliadine (28-39 kDa) e una composizione aminoacidica e una struttura correlata con le quali condividono un dominio C-terminale omologo, mentre il dominio N-terminale è costituito da unità ripetitive ricche di glutammina e prolina. Delle otto cisteine che le caratterizzano, sei occupano posizioni omologhe a quelle delle gliadine e formano legami disolfuro intracatena, mentre le due cisteine aggiuntive, esclusive delle LMW-GS, danno origine ai legami intercatena che consentono l'integrazione di queste subunità nel reticolo polimerico. Le LMW-GS contribuiscono così all'estensione della rete gluteninica

(Wieser, 2007). Per quanto riguarda le LMW-GS, la classificazione utilizzata prevede una nomenclatura definita in subunità B, C e D in base alle differenze di mobilità su gel di poliacrilammide (SDS-PAGE). Le LMW-GS di tipo B sono codificate dai loci *Glu-3* sul braccio corto dei cromosomi omeologhi del gruppo 1, strettamente concatenati ai loci *Gli-1*, mentre le LMW-GS di tipo C sono codificate dai loci *Gli-1* sul braccio corto dei cromosomi del gruppo 1 o dai loci *Gli-2* sul braccio corto dei cromosomi del gruppo 6. Infine, le LMW-GS di tipo D sono codificate dai loci *Gli-1* dei cromosomi del gruppo 1 (Veraverbeke & Delcour, 2002).

Le subunità HMW rappresentano in media solo il 10% delle proteine totali del glutine, tuttavia sono funzionalmente molto importanti, visto che rappresentano la porzione principalmente responsabile della forza e dell'elasticità dell'impasto. Queste subunità HMW sono codificate dai geni *Glu-1*, localizzati sul braccio lungo dei cromosomi del gruppo 1. In totale, nelle specie di grano esaploide, si trovano sei geni che codificano per HMW, che si dividono in due per ogni locus *Glu-1* dei cromosomi del gruppo 1 (1A, 1B, 1D) (Payne et al., 1982); ognuno di questi loci codifica per una subunità di tipo x e per una di tipo y, che si differenziano principalmente per il numero di residui di cisteina presenti nella parte N-terminale: 3 residui nel caso delle subunità di tipo x, 5 nel tipo y (Wieser, 2007).

Tramite elettroforesi denaturante in sodio dodecil solfato (SDS-PAGE) (Figura 1.13) è stato possibile identificare da 3 a 5 subunità gluteniniche ad alto peso molecolare distintive di ogni varietà di frumento, che si dividono in tipo x e tipo y con peso molecolare rispettivamente compreso tra 83.000 e 88.000 Da per il tipo x e tra 67.000 e 74.000 Da per il tipo y (Wieser, 2007). Numerosi studi hanno dimostrato che le proprietà dell'impasto sono fortemente influenzate dalla quantità e dalla tipologia di HMW-GS presenti nella farina, soprattutto per il contributo del tipo x alle proprietà dell'impasto, risultato più importante rispetto a quello del tipo y; in particolare la presenza delle subunità Dx5 e Bx7 è risultata particolarmente favorevole alla qualità dell'impasto e al volume del pane (Wieser, 2007). Infine, la struttura del reticolo gluteninico e il comportamento reologico della farina dipendono dall'insieme e dalle proporzioni relative di HMW-GS e LMW-GS (D'Ovidio & Masci, 2004).

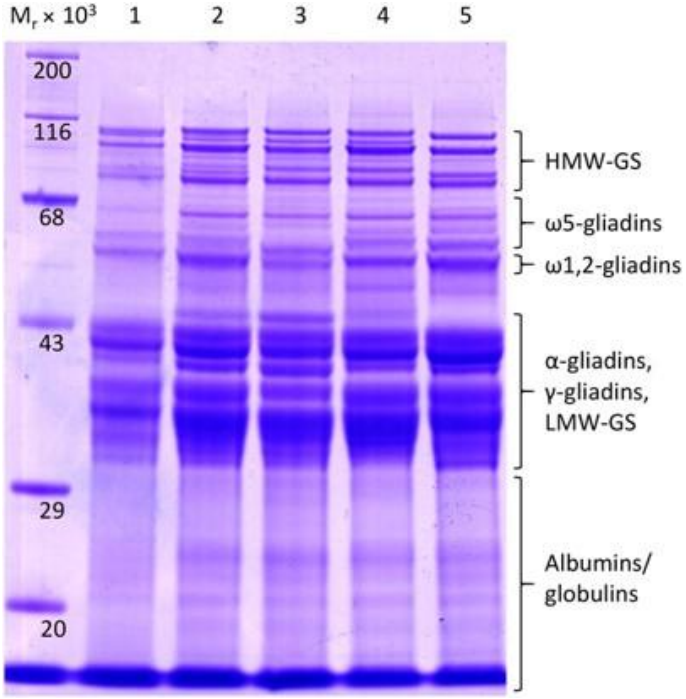

Figura 1.13 - *Elettroforesi su gel di poliacrilammide con dodecil solfato di sodio (SDS-PAGE) delle proteine della farina di frumento, in condizioni riducenti, che illustra la distribuzione del peso molecolare delle subunità gluteniniche. Riprodotta da Wieser et al. (2023), Cereal Chemistry.*

1.5 Qualità tecnologica

La qualità tecnologica di una farina di frumento è determinata dall'interazione tra le due classi di proteine di riserva, gliadine e glutenine, che si aggregano in presenza di acqua durante l'impastamento, formando il glutine, un reticolo dotato di proprietà viscoelastiche uniche quali l'estensibilità e l'elasticità (Figura 1.14). L'estensibilità garantisce l'espansione del volume della massa durante la lievitazione e nelle fasi iniziali della cottura, mentre l'elasticità consente di mantenere la forma desiderata. È da questo equilibrio che dipende la capacità dell'impasto di trattenere i gas prodotti durante la lievitazione e, quindi, di espandersi conferendo al prodotto finito volume e struttura alveolata (Peressini, 2017; Wieser, 2007).

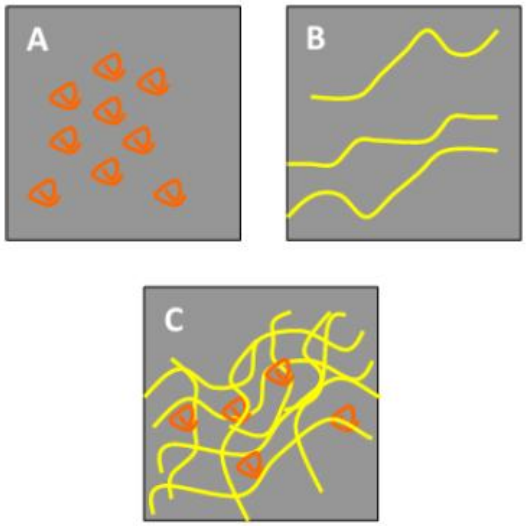

Figura 1.14 - Rappresentazione schematica delle gliadine (A), delle glutenine (B) e del glutine (C). Adattata da Peressini (2017), Bollettino Panta Rei.

Le subunità gluteniniche ad alto peso molecolare (HMW-GS), pur essendo una frazione minoritaria del glutine, rivestono un ruolo importantissimo nella qualità panificatoria. La loro composizione, regolata dai loci *Glu-1*, influenza direttamente la forza dell'impasto (Payne, 1987). In relazione alle proprietà reologiche dell'impasto, si ritiene che la gliadina contribuisca all'estensibilità, mentre la glutenina conferisca elasticità e forza (Wieser, 2007). Numerosi studi hanno dimostrato che la resistenza massima dell'impasto è direttamente correlata alla quantità di subunità gluteniniche e al rapporto tra gliadine e glutenine, con un contributo delle subunità di tipo x superiore a quello delle subunità di tipo y; inoltre, a parità di questo rapporto, le subunità ad alto peso molecolare esercitano il doppio dell'effetto rispetto a quelle di basso peso molecolare (Wieser & Kieffer, 2001). Le subunità gluteniniche a basso peso molecolare (LMW-GS), codificate dai loci *Glu-3*, interagiscono anche con le glutenine partecipando alla definizione del comportamento reologico complessivo (Gupta & MacRitchie, 1994). La combinazione più favorevole delle subunità HMW-GS che fornisce un indice di buona qualità panificatoria è la presenza della subunità 1Ax e di una coppia di subunità presenti sul cromosoma 1D, 1Dx5 + 1Dy10 (Shewry & Halford, 2002). La loro funzione principale è dovuta alla capacità che hanno di formare polimeri attraverso i legami disolfuro intermolecolari (Wieser, 2007).

Anche per le gliadine sono stati ottenuti dati sperimentali che dimostrano una stretta associazione tra la presenza di determinati alleli e la qualità del glutine (Branlard &

Dardevet, 1985). Ad esempio, è stato osservato nel frumento tenero, che la presenza di due forme alleliche di un gene codificante per le γ-gliadine nel locus *Gli-B1*, designate come bande γ-40 e γ-43,5 (in relazione alla mobilità relativa su gel di poliacrilammide a pH acido, A-PAGE), sono collegate rispettivamente a cattiva e buona *performance* qualitativa (Dal Belin Peruffo et al., 1985); studi più recenti confermano la rilevanza di questo locus per la qualità, pur sottolineando come la relazione tra uno specifico allele e la qualità possa variare tra cultivar diverse (Metakovsky et al., 2021). Queste gliadine sono strettamente legate alle subunità a basso peso molecolare (LMW-GS) perché sono codificate dal locus *Gli-1* in stretta associazione con il locus *Glu-3* codificante per le LMW-GS. L'utilizzo di tecniche di estrazione ed elettroforesi ha dimostrato che le gliadine influenzano soprattutto la viscosità dell'impasto, perché sono capaci di inserirsi tra i polimeri gluteninici creando legami non covalenti, modificando così il comportamento reologico (Shewry & Tatham, 1997).

Oltre alla presenza di gliadine e glutenine, un ulteriore parametro proteico influenza la qualità tecnologica del frumento tenero: il grado di durezza (o *hardness*) della cariosside (Morris, 2002). Tale carattere è influenzato dalla presenza di un gruppo distinto di proteine note come puroindoline, presenti sotto due forme, puroindolina-a (PINA) e puroindolina-b (PINB), che rivestono una particolare importanza anche dal punto di vista tassonomico, dato che sono presenti nelle specie diploidi ed esaploidi di *Triticum* , ma assenti nelle specie tetraploidi (Gautier et al., 2000). Il locus della durezza è codificato sul cromosoma 5DS, con l'allele dominante *soft* (Ha) e il recessivo *hard* (ha). Queste proteine sono ricche di cisteina e si legano alla superficie dei granuli di amido, diminuendo l'adesione dello stesso alla matrice proteica. La loro presenza conferisce alla granella una tessitura tenera (*soft*), mentre una loro carenza ne determina una tessitura dura (*hard*) (Krishnamurthy & Giroux, 2001). A questa famiglia è associata la proteina GSP-1 (*grain softness protein-1*), codificata nello stesso cromosoma delle puroindoline (5DS), che, insieme alle puroindoline, rappresenta un anello di congiunzione fondamentale tra la composizione proteica della cariosside e la sua qualità tecnologica (Krishnamurthy & Giroux, 2001; Morris et al., 2013).

Sulla base del grado di durezza si possono distinguere diverse classi qualitative (Tabella 1.4), la cui determinazione viene comunemente effettuata mediante un indice di durezza (*hardness index*, HI) ottenuto mediante analisi spettroscopia nel vicino infrarosso (*near infrared reflectance*, NIR), il cui valore aumenta all'aumentare della durezza della cariosside (ICC 202; AACC 39-70A). Le varietà a granella *soft* presentano una cariosside più friabile, che richiede quindi minori tempi, quantità d'acqua ed energia per la macinazione; hanno inoltre una granulometria fine che, grazie al ridotto danneggiamento dei granuli di amido durante la macinazione, determina una resa migliore rispetto alle varietà *hard*. Queste caratteristiche fanno sì che i frumenti di tipo soft siano impiegati per la produzione di biscotti e torte. Le varietà a granella hard e medium, per contro, possiedono caratteristiche tecnologiche ottimali per la produzione di pane e prodotti da forno (Jolly et al., 1996).

Tabella 1.4 .

Classificazione della durezza della cariosside in funzione dell'indice di *Hardness* (NIR), secondo il protocollo del laboratorio CREA-CI di Vercelli.	
Indice di *Hardness*	Classe di *Hardness*
< 40	*Soft*
41–70	*Medium*
> 70	*Hard*

1.5.1 Classificazione merceologica

Il Decreto del Presidente della Repubblica n° 187 del 2001 (D.P.R. n. 187/2001) stabilisce la normativa sulla produzione e commercializzazione degli sfarinati di frumento in base al contenuto di umidità, ceneri e proteine (Tabella 1.5). Tali parametri però non danno indicazione delle caratteristiche viscoelastiche degli impasti, né tantomeno del comportamento degli sfarinati durante la loro trasformazione (Mariotti et al., 2002).

Tabella 1.5.

Requisiti commerciali richiesti dal DPR n° 187 del 9/2/2001 (valori riferiti a cento parti di sostanza secca).				
Tipo di farina	**Umidità max (%)**	**Ceneri min (% s.s.)**	**Ceneri max (% s.s.)**	**Proteine min (% s.s.)**
Tipo 00	14,50 (max. 15)	–	0,55	9,00
Tipo 0	14,50 (max. 15)	–	0,65	11,00
Tipo 1	14,50 (max. 15)	–	0,80	12,00
Tipo 2	14,50 (max. 15)	–	0,95	12,00
Integrale	14,50 (max. 15)	1,30	1,70	12,00

L'associazione interprofessionale della filiera cerealicola italiana (Assincer) un organizzazione senza fini di lucro, adottò nell'anno 1997 un indice completo per la determinazione della qualità degli sfarinati di frumento tenero ai fini della loro trasformazione, chiamato Indice Sintetico di Qualità (ISQ), già adottato in precedenza da ITALMOPA (Associazione Italiana degli industriali dei Mugnai e Pastai) nel 1995 (Borasio, 1997). Questo indice viene ricavato combinando diversi parametri tecnologici ottenuti con la realizzazione di diverse analisi di laboratorio: chimiche, fisiche, enzimatiche, reologiche e funzionali (Figura 1.15).

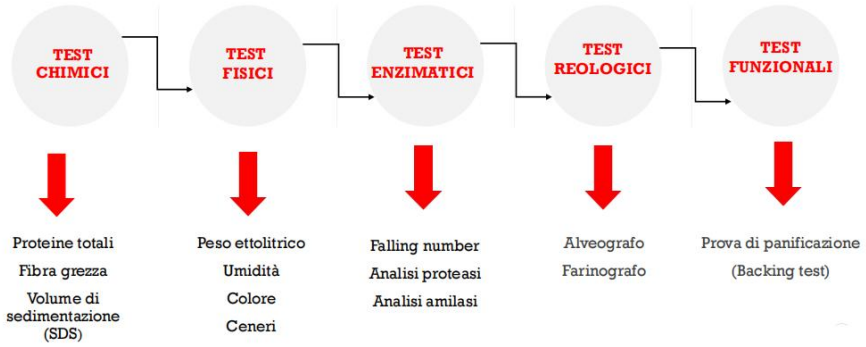

Figura 1.15 - Principali analisi qualitative effettuate sul frumento tenero. Elaborata da Romano G. (2026).

Questo indice individua quattro classi di frumenti (Tabella 1.6): frumenti di forza (FF), frumenti panificabili superiori (FPS), frumenti panificabili (FP), frumenti da biscotto (FB), che vengono assegnati seconda dei valori riportati nelle varie analisi sopra elencate. I frumenti che non ricadono in questa classificazione vengono definiti frumenti per altri usi (FAU) (Borasio, 1997).

Nel complesso la valutazione del comportamento di una farina alla trasformazione viene realizzata attraverso diversi parametri chiave ottenuti con tecniche standardizzate, quali il contenuto proteico, che fornisce una stima indiretta della quantità di glutine che può sviluppare; il peso ettolitrico, indicatore della resa dopo la molitura; l'indice di caduta di Hagberg (*Falling Number*), che valuta l'attività enzimatica dell'alfa-amilasi e di conseguenza il grado di integrità dell'amido; e i parametri reologici, determinati mediante l'alveografo di Chopin e il farinografo di

Brabender, che permettono di simulare, rispettivamente, il comportamento dell'impasto durante la lievitazione e l'impastamento (Delcour & Hoseney, 2010).

Tabella 1.6.

Classificazione del frumento tenero secondo l'Indice Sintetico di Qualità (ISQ) (Borasio, 1997).				
Parametri qualitativi	Frumento di forza (FF)	Frumento panificabile superiore (FPS)	Frumento panificabile (FP)	Frumento da biscotto (FB)
Peso ettolitrico (kg/hL)	>75	>75	>75	>75
Proteine (% s.s.)	12,5-14,5	11,5-12,5	10-11,5	<10
Indice di Hagberg (secondi)	>250	>220	>220	>220
P/L alveografico	0,7-1,2	<0,8	<0,7	<0,5
W alveografico (10^{-4}J)	300-340	220-300	140-220	<140
Stabilità farinografica (min)	>13	>10	>4	<4
Falling Number (sec)	>250	>220	>220	>220

1.5.2 Macinazione

La macinazione del frumento viene utilizzata per rompere il chicco di frumento e separarne i componenti (endosperma, crusca e germe), in modo da recuperare la massima quantità di endosperma (farina), con una contaminazione minima da crusca e germe (Campbell, 2007). È considerata da molti l'industria più antica praticata ininterrottamente fin dalle prime civiltà agricole (Cappelli et al., 2020), quando la trasformazione della cariosside del frumento in farina avveniva utilizzando strumenti rudimentali come il mortaio e il pestello, per poi evolversi verso le macine a pietra, la cui pratica sì protrasse per secoli dall'epoca romana fino a gran parte del XIX secolo. Con l'avvento della Rivoluzione Industriale, nella seconda metà dell'Ottocento, la macinazione a pietra venne sostituita progressivamente dalla molitura a cilindri (Figura 1.16), insieme all'introduzione di setacci meccanici e purificatori, fino ad arrivare a sviluppare tecnologie più sofisticate (Fišteš, 2021) .

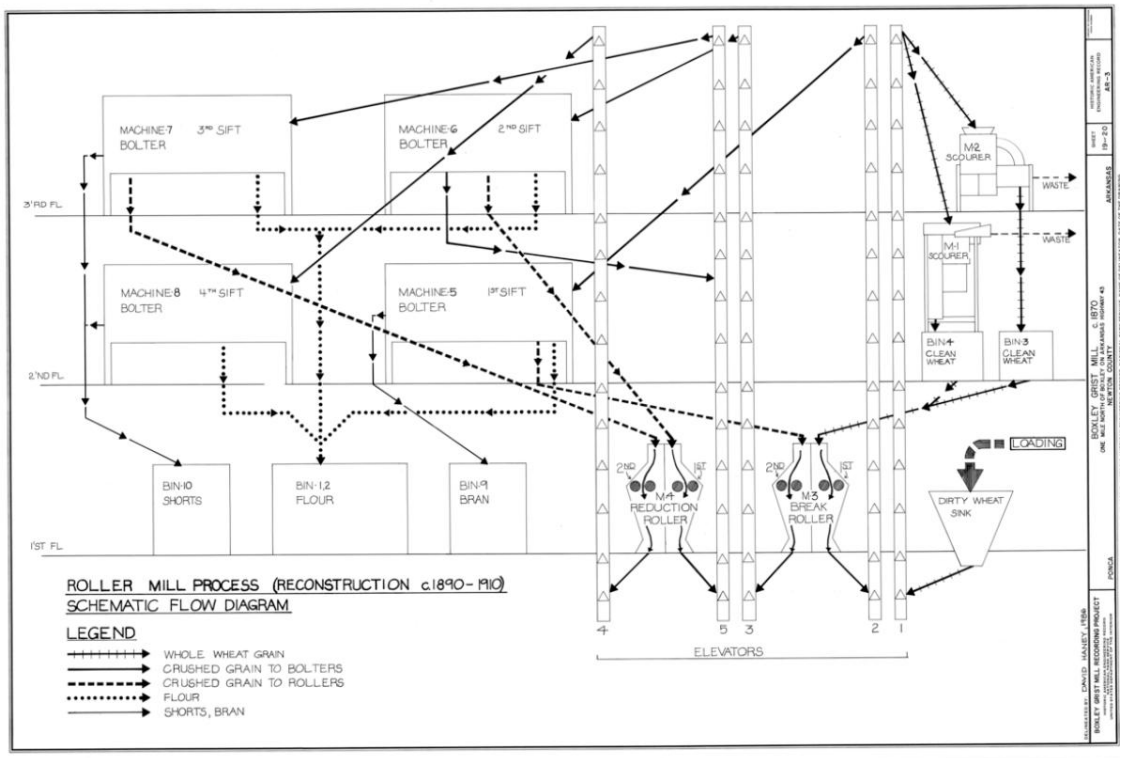

Figura 1.16 - *I processi industriali di macinazione del frumento si basano su un approccio di riduzione graduale delle dimensioni, con ripetute fasi di macinazione e setacciatura per ottenere una frantumazione adeguata della cariosside e la sua efficace trasformazione in farina. Questo approccio aumenta notevolmente la resa in farina, ma rende il processo più complesso da comprendere e gestire. Uno dei parametri più importanti per caratterizzare la farina di frumento è la distribuzione granulometrica: le farine con diversa distribuzione granulometrica differiscono per proprietà fisiche e composizione chimica (Wang & Flores, 2000). Di conseguenza, queste proprietà influenzano la prestazione della farina durante la preparazione del prodotto finale (Hatcher et al., 2002).*

Lo studio reologico realizzato da Cappelli e collaboratori (2020) ha messo a confronto i due sistemi di macinazione, evidenziando alcuni vantaggi per ciascuno. La macinazione a pietra si distingue per la sua semplicità operativa, oltre a fornire una farina ricca di macroelementi, microelementi e polifenoli; a questo si aggiunge un maggiore volume del pane ottenuto, nonché un migliore gradimento da parte del consumatore. D'altro canto, la macinazione a cilindri garantisce una maggiore efficienza produttiva e flessibilità di impiego, un minore sviluppo di calore durante il processo e una migliore prestazione reologica dell'impasto. Questo studio ha messo in luce i vantaggi e i limiti di ogni tecnologia, per cui la scelta del sistema più idoneo va realizzata in funzione dell'obiettivo produttivo, delle esigenze dell'azienda molitoria e delle caratteristiche richieste dal mercato (Cappelli et al., 2020).

Un altro parametro importante nel processo di macinazione è il tasso di estrazione, che viene definito come la quantità di farina ottenuta rispetto al peso della granella di

partenza: questo parametro esprime in maniera diretta il grado di raffinazione del prodotto. Un tasso di estrazione molto elevato corrisponde a una farina con un alto contenuto di tessuti periferici e di strato aleuronico, di colore scuro e con un alto contenuto di minerali; un tasso di estrazione basso, invece, corrisponde a una farina più raffinata, di colore chiaro, costituita quasi esclusivamente da endosperma amilaceo. La scelta di questo tasso di estrazione rappresenta pertanto un compromesso tra la resa in farina e la sua purezza, e condiziona non soltanto le caratteristiche merceologiche del prodotto, ma anche le sue proprietà tecnologiche e nutrizionali (Delcour & Hoseney, 2010).

La presenza o assenza di minerali (fosforo, potassio, magnesio e calcio) nella farina di frumento è indicativa del suo grado di raffinazione, quantificato come tenore in ceneri, poiché i sali minerali sono concentrati nello strato aleuronico e negli involucri cruscali, mentre l'endosperma amilaceo ne è relativamente povero. Un contenuto in ceneri basso corrisponde a una farina più raffinata, più povera di tessuti cruscali residui, mentre valori elevati corrispondono a una farina ricca di strati periferici (Rosa-Sibakov et al., 2015).

1.5.3 Analisi tecnologiche semplici

Con questa terminologia vengono indicati una serie di metodi destinati a valutare la qualità tecnologica di determinate linee di frumento, e anche della farina che se ne ricava, nel momento in cui si dispone di piccole quantità di granella, tali da rendere impraticabile l'impiego delle prove reologiche convenzionali, quali l'alveografo e il farinografo, che richiedono quantità di sfarinato dell'ordine delle centinaia di grammi. Tali analisi sono caratterizzate da rapidità di esecuzione e comprendono solitamente la determinazione del contenuto di umidità, ceneri e proteine, dell'attività alfa-amilasica e la valutazione della qualità del glutine, mediante l'indice di sedimentazione in SDS. Queste analisi sono capaci di fornire una stima affidabile dell'attitudine tecnologica a partire da pochi grammi di campione, e di consentire così lo screening rapido di un elevato numero di genotipi (Seabourn et al., 2012; Kibkalo, 2022).

1.5.3.1 Test di volume di sedimentazione in (SDS)

È un'analisi fisico-chimica che consente di valutare la qualità panificatoria della farina di frumento basandosi sulle caratteristiche di rigonfiamento e flocculazione delle proteine del glutine in una soluzione di sodio dodecil solfato (SDS) e acido lattico. I risultati vengono espressi in mL: un valore di volume di sedimentazione più elevato indica un alto contenuto di glutine, forza e qualità (Zeleny, 1962, citato in Muqaddasi et al., 2023). La versione originale del test è chiamata *test* di Zeleny (metodo ICC 116/1; UNI EN ISO 5529), che utilizza solamente la soluzione acida; questa versione è stata successivamente modificata con l'aggiunta di SDS alla soluzione acida, il che ha permesso di aumentare la sensibilità del test (D'Egidio & Carcea, 2013). Questo *test* viene realizzato sulla granella macinata integrale o sulla farina raffinata. L'indice di Zeleny è un parametro utilizzato per gli studi di miglioramento genetico e nelle analisi rapide per prevedere la qualità panificatoria complessiva del frumento. Per esempio, in uno studio realizzato su 372 varietà europee di frumento tenero, i valori di volume di sedimentazione osservati sono risultati compresi tra un minimo di 26 mL e un massimo di 64 mL; questa ampia variabilità, fortemente controllata dal corredo genetico ereditato ($H^2 = 0,96$), rende il volume di sedimentazione un carattere molto utile per la selezione genetica (Muqaddasi et al., 2023).

*1.5.3.2 Hagberg Falling Number (*HFN*) o indice di caduta di Hagberg*

Il *test* dell'indice di caduta di Hagberg-Perten è una misura indiretta della quantità dell'enzima alfa-amilasi, responsabile della degradazione dell'amido, nella farina di frumento (Perten, 1964). L'esecuzione del *test* consiste nel portare una sospensione acquosa di sfarinato a rapida gelatinizzazione mediante immersione in un bagno di acqua bollente, per poi misurare, in secondi, il tempo impiegato da uno stantuffo metallico per attraversare la sospensione: tale tempo dipende dalla velocità con cui l'enzima amilasi degrada l'amido presente nel campione (D'Egidio & Carcea, 2013). Il principio fondamentale di questo *test* è che una maggiore attività dell'alfa-amilasi degrada più velocemente l'amido in zuccheri semplici (glucosio e maltosio), rendendo la sospensione meno densa e permettendo così allo stantuffo di scendere rapidamente, il che si traduce in valori di HFN bassi. Al contrario, quando l'amido non viene degradato dall'enzima alfa-amilasi, la sospensione rimane densa e di conseguenza, lo

stantuffo scende lentamente, determinando un HFN elevato. Un HFN ridotto, dovuto ad un'elevata attività amilasica, è associato prevalentemente alla pregerminazione (*pre-harvest sprouting*), ossia alla germinazione delle cariossidi quando sono ancora presenti sulla spiga, prima della trebbiatura. Tale fenomeno si verifica soprattutto in annate caratterizzate da precipitazioni persistenti nelle fasi immediatamente precedenti la mietitura. Questa condizione ha un impatto significativamente negativo sulla qualità tecnologica del grano e di conseguenza sulla farina che ne deriva, dando origine a impasti appiccicosi e più deboli, nonché a pagnotte di pane più piccole e deformate (Muqaddasi et al., 2023).

Nella pratica panificatoria, a livello industriale si considera ideale un intervallo HFN compreso tra 220 e 280 secondi: valori al di sotto di 220 secondi sono indicativi di un'eccessiva attività amilasica, generalmente legati alla germinazione preraccolta, mentre valori al di sopra di 350 secondi sono indicativi di un'attività insufficiente, che può essere corretta mediante l'aggiunta di farina maltata o di enzimi amilolitici (BAKERpedia, s.d.).

1.5.4 Analisi tecnologiche complesse

Comprendono una serie di prove fisiche, fisico-chimiche, chimiche e sensoriali sulla farina, sull'impasto e sul prodotto da forno (Figura 1.17). Tra queste, le prove fisiche condotte sull'impasto si basano prevalentemente su metodi reologici empirici, quali le analisi farinografica, alveografica, mixografica, amilografica ed estensografica, che tradizionalmente sono utilizzati nell'industria molitoria e panificatoria per correlare il comportamento reologico dell'impasto con le sue prestazioni durante le fasi di impasto, lievitazione e cottura, nonché con la qualità della farina, e sono ampiamente utilizzati in ambito industriale e nella ricerca, grazie alla loro comprovata capacità predittiva (Yazar, 2023).

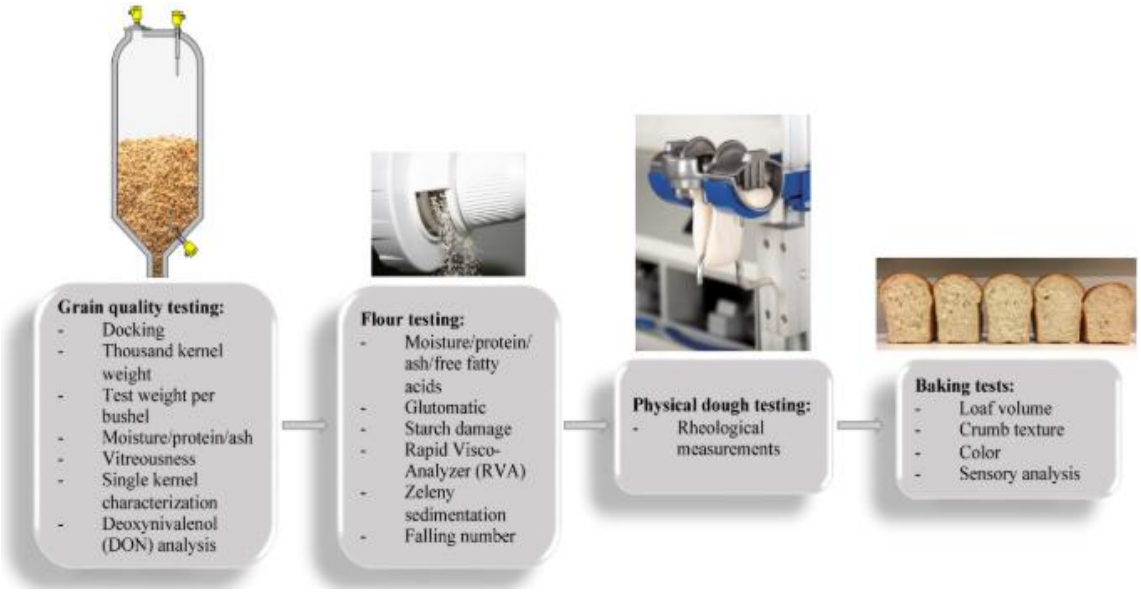

Figura 1.17 - Metodi di analisi della qualità del grano (Yazar, 2023).

1.5.4.1 Farinografo di Brabender

Il farinografo di Brabender è uno strumento di analisi reologica che misura la resistenza meccanica di un impasto di acqua e farina durante una lavorazione a 30°C, simulando la sollecitazione dell'impasto a livello industriale (metodo ICC 115/1; ISO 5530; AACC 54-21.02; UNI 10790). Durante la fase di impastamento viene registrato un grafico, denominato farinogramma, da cui è possibile ricavare diversi parametri.

Il primo parametro è la percentuale di assorbimento idrico, che rappresenta la quantità di acqua massima che può assorbire la farina per produrre un impasto di consistenza ottimale e raggiungere il picco del farinogramma sulla linea delle 500 unità di Brabender (UB); tale valore riflette la capacità delle proteine di assorbire acqua e costituisce quindi un indice di qualità panificatoria. La percentuale di assorbimento idrico dipende significativamente dal contenuto proteico e dal contenuto in ceneri della farina (Sedláček & Švec, 2023). Il secondo parametro è il tempo di sviluppo (espresso in minuti), che corrisponde all'intervallo di tempo necessario perché l'impasto raggiunga la consistenza ottimale di 500 UB, dopo aver aggiunto la quantità di acqua ottimale. Il terzo parametro è la stabilità farinografica, anch'essa espressa in minuti, che rappresenta il periodo di tempo durante il quale l'impasto mantiene tale consistenza ottimale. Valori elevati di stabilità farinografica sono associati alla tenacità della farina, capace di sopportare lunghi processi di lavorazione meccanica e

lievitazione, senza perdere la struttura. Il quarto parametro è il grado di caduta o rammollimento, espresso in unità Brabender (UB) che quantifica la perdita di consistenza dell'impasto, misurata dopo 20 minuti di impastamento. Valori elevati di caduta corrispondono a impasti che perdono rapidamente consistenza e mostrano una limitata forza glutinica, caratteristica delle farine deboli; al contrario, valori bassi corrispondono ad impasti più forti e stabili, capaci di mantenere la struttura anche quando sono sottoposti a lunghi processi di sollecitazione meccanica (D'Egidio & Carcea, 2013).

1.5.4.2 Alveografo di Chopin

È uno strumento che consente di valutare il comportamento di un impasto costituito da farina a cui viene aggiunta una soluzione al 2,5% di NaCl (metodo standard ICC 121/2; AACC 54-30.02A; UNI EN ISO 27971), quando questo viene insufflato con aria. Il processo viene registrato in un grafico chiamato alveogramma (Figura 1.18), il quale fornisce diversi parametri: la tenacità (P), che esprime la resistenza massima opposta dall'impasto alla deformazione e rappresenta l'altezza massima della curva, l'estensibilità (L), che misura la capacità dell'impasto di allungarsi prima della rottura della bolla, il rapporto tra tenacità ed estensibilità (P/L), che esprime l'equilibrio dell'impasto e la forza della farina (W), che corrisponde all'area sottesa alla curva ed esprime la forza complessiva dell'impasto, positivamente correlata alla qualità panificatoriae (Delcour & Hoseney, 2010; D'Egidio & Carcea, 2013). L'industria di trasformazione richiede valori elevati di W (>180 x 10^{-4} J) associati a indici P/L equilibrati (0,40-0,60); tali requisiti possono cambiare in funzione della destinazione d'uso (D'Egidio & Carcea, 2013).

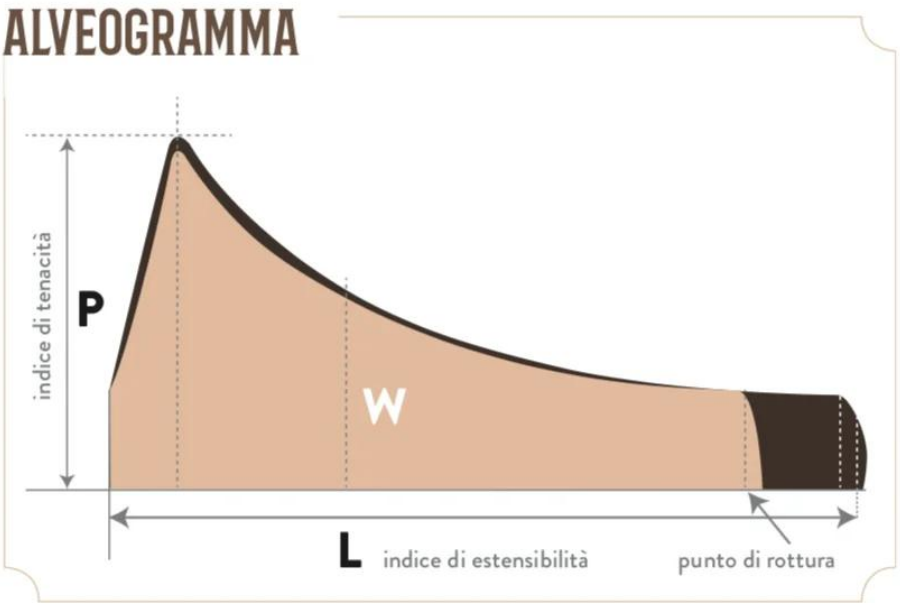

Figura 1.18 - *Alveogramma*

1.5.4.3 Amilografo di Brabender

L'amilografo di Brabender è un metodo standardizzato da AACC, ICC e ISO (Rakita et al., 2015), che monitora le variazioni delle proprietà di gelatinizzazione di una sospensione di sfarinato in acqua sottoposta ad agitazione e a riscaldamento progressivo, misurando la successiva liquefazione dell'amido contenuto nel campione ad opera dell'alfa-amilasi. Lo strumento è impiegato principalmente per determinare l'effetto dell'alfa-amilasi sulla viscosità della farina in funzione della temperatura (D'Egidio & Carcea, 2013). È inoltre uno dei metodi più sensibili e disponibili per valutare i danni da germinazione nei cereali (Meredith, 1983; Yazar, 2023).

Un aspetto rilevante di questa metodologia è stato studiato da Meredith (1983), che dimostrò il contributo delle proteine presenti nella farina alla viscosità della pasta; questa caratteristica è stata evidenziata quando si è confrontata la farina di frumento con l'amido puro estratto dalla stessa, in assenza di attività enzimatica. Questa informazione è importante perché la curva amilografica riflette non solo il comportamento dell'amido ma anche l'interazione di esso con la componente proteica (Meredith, 1983).

Inattivando una parte della farina e mantenendo il resto in uno stato enzimaticamente attivo, si possono ottenere delle curve comparative che mostrano l'effetto dell'attività

enzimatica (legata alla germinazione in campo) sul materiale danneggiato, in condizioni di gelatinizzazione che riproducono alcuni aspetti delle condizioni di utilizzo industriale. L'amilografo è inoltre impiegato per valutare le proprietà di gelatinizzazione degli amidi e per determinare l'attività diastasica (o indice di maltaggio) della farina (Pojić et al., 2013).

1.5.4.4 Mixografo

È uno strumento utilizzato principalmente per prevedere le proprietà di impastamento di diverse cultivar di frumento soprattutto nelle prime generazioni di selezione. Il suo impiego a questo scopo risale al lavoro di Finney e Shogren (1972), essendo i primi a descriverne l'applicazione predittiva (citato in Khatkar et al., 1996). Inoltre, questa metodologia è stata impiegata per lo studio e l'ottimizzazione di vari additivi quali ossidanti, riducenti miglioratori reologici ed enzimi, comunemente utilizzati nella panificazione (Tsen, 1969; Lang et al., 1992). Questa tecnica è particolarmente utile quando si ha disposizione una piccola quantità di campione (Rath et al., 1990; Gras & O'Brien., 1992; Yazar, 2023).

Lo strumento fornisce un grafico della reazione dell'impasto man mano che viene idratato, miscelato fino al valore ottimale, poi si degrada sotto l'azione della miscelazione. I valori di assorbimento d'acqua vengono standardizzati in base alla classificazione della cariosside, secondo il *test* di durezza (*hardness*), dura, intermedia o tenera (metodo AACC 54-40A).

1.5.4.5 Estensografo di Brabender

È uno strumento reologico che fornisce la misurazione della relazione sforzo-deformazione dell'impasto dopo il periodo della fermentazione (Chen et al., 2009; Preston & Hoseney, 1991). Questo strumento estensigrafico consente di valutare molteplici fattori legati alla qualità del frumento, tra cui le caratteristiche di estensibilità dell'impasto, parametro utile a prevedere l'attitudine alla panificazione e a determinare la qualità del glutine; inoltre viene utilizzato per standardizzare le proprietà ottimali dell'impasto per i prodotti da forno e per analizzare gli effetti specifici di ingredienti o additivi (Chen et al., 2009).

Dal punto di vista del miglioramento genetico, questa metodologia permette di differenziare la qualità delle diverse linee di miglioramento genetico e di migliorare lo screening rapido delle cultivar di frumento, oltre a controllare la qualità della farina sia per l'industria molitoria che per quella della panificazione (Chen et al., 2009). Uno dei principali svantaggi del metodo estensografico è la quantità di campione necessaria per realizzare la prova (300g), oltre ai tempi di analisi lunghi e una preparazione complessa dell'impasto; questi limiti hanno impedito che questo metodo fosse ampiamente utilizzato nei programmi di miglioramento genetico di diverse linee di cultivar (Nash et al., 2006).

1.6 Grani storici

Il rinnovato interesse per le varietà "antiche", più propriamente definite "storiche", di frumento tenero costituisce un tratto caratteristico della cerealicoltura degli ultimi anni, sia in Italia sia a livello mondiale. Tale orientamento si pone in netta controtendenza rispetto agli obiettivi perseguiti nel secolo scorso, quando l'impegno volto a concretizzare una prospettiva di miglioramento economico considerevole, unito alla necessità di soddisfare il fabbisogno di una popolazione in crescita, ha determinato la diffusione di varietà ritenute più "performanti", sia per caratteristiche della pianta sia per rese produttive. Il XX secolo ha pertanto contribuito significativamente a porre a serio rischio di "estinzione" le cosiddette varietà "storiche", oggi al centro di un'attiva riscoperta (Dinu et al., 2018). Lo studio di questi materiali consente di conservare le tradizioni locali, favorendo lo sviluppo di filiere piccole ad alta valenza territoriale, e rappresenta una potenziale fonte di composti bioattivi di interesse nutrizionale, aspetti che ne rafforzano la valorizzazione (Berni et al., 2018). Inoltre, mostrano spesso buona stabilità produttiva in condizioni di stress idrico da siccità e terreni poveri di nutrienti, tipiche delle aree marginali, dove tendono a mantenere rese più costanti rispetto alle varietà moderne, generalmente selezionate per rispondere in modo ottimale a un elevato apporto di risorse e a condizioni ambientali favorevoli (Preiti et al., 2022). La loro conservazione consente quindi di mantenere in vita una preziosa fonte di variabilità genetica, da analizzare e approfondire per rispondere a problematiche presenti e future, tra le quali il cambiamento climatico in atto.

Le varietà "storiche" risalgono all'inizio del Novecento molto prima della Rivoluzione Verde, di cui Norman Borlaug (1914-2009), insignito del Premio Nobel per la pace nel 1970, è considerato il padre. Il punto di partenza per le attività di ricerca di Borlaug finalizzate all'individuazione di varietà ad alta resa furono gli studi precedentemente condotti da Nazareno Strampelli (1866-1942), che fu pioniere del miglioramento genetico e artefice di una vera e propria svolta produttiva all'inizio del secolo scorso: Ardito, Mentana e San Pastore sono solo alcune delle celebri varietà precoci ottenute da Strampelli mediante incrocio e selezione, protagoniste della "Battaglia del grano", la campagna volta a incrementare la produzione cerealicola nazionale nel primo Novecento. L'anticipo con cui Strampelli applicò i principi dell'ibridazione, decenni prima della diffusione internazionale delle varietà a taglia ridotta, gli è valso il riconoscimento di precursore della Rivoluzione Verde (Salvi et al., 2013; Tauger, 2023).

Alla fine del XIX e all'inizio del XX secolo, la coltivazione del frumento tenero era basata su popolazioni locali definite *landraces*, tra cui "Rieti", una delle varietà che Strampelli sottopose a incrocio e selezione, ottenendone linee di grande valore per l'incremento produttivo. Oltre ad apprezzabili aspetti qualitativi, le *landraces* si caratterizzano per una spiccata adattabilità ambientale, che ne ha promosso un'ampia diffusione sul territorio italiano. La progressiva sostituzione di queste popolazioni con le varietà moderne, più uniformi e produttive, ha tuttavia originato un consistente fenomeno di perdita d'identità genetica, a causa di numerosi eventi di inquinamento, sia meccanico (durante semina, raccolta, stoccaggio e operazioni colturali), sia genetico (moltiplicazione delle colture con scarsa cautela) (Dreiseitl & Nesvadba, 2026). A ciò si aggiunge una problematica correlata alla denominazione, poiché tra le varietà storiche si riscontrano numerose linee *sinonime*, che recano nomi diversi pur corrispondendo al medesimo genotipo, e, all'opposto, casi di *omonimia*, in cui denominazioni identiche indicano materiali geneticamente distinti (Ormoli et al., 2015).

Per questo motivo, una puntuale caratterizzazione delle varietà storiche risulta necessaria al fine di chiarire un quadro piuttosto complesso e poco ordinato. In passato i tentativi di soddisfare tale obiettivo erano basati esclusivamente sul confronto delle

caratteristiche fenotipiche del materiale analizzato; tuttavia, la sola valutazione dell'aspetto morfologico non è sufficiente a discriminare correttamente le linee sinonime, poiché a fenotipi simili può associarsi una significativa distanza genetica. Per superare questo limite si è affermato un approccio integrato, che affianca ai descrittori morfologici l'analisi diretta della composizione del chicco: in particolare, la separazione elettroforetica delle proteine di riserva ha costituito un punto di svolta nella corretta attribuzione varietale, poiché il profilo delle gliadine e delle subunità gluteniniche fornisce, per ciascuna varietà, una vera e propria impronta molecolare correlata al patrimonio genetico. L'analisi del polimorfismo delle gliadine, in particolare, si è rivelata un efficace strumento per discriminare i genotipi di frumento tenero e per stimarne la diversità genetica (Utebayev et al., 2019).

Insieme all'identità genetica, un ruolo altrettanto importante è rivestito dalla caratterizzazione tecnologica, che valuta l'attitudine delle diverse varietà alla trasformazione e alla panificazione, visto che la loro composizione in proteine di riserva, il rapporto tra gliadine e glutenine e la specifica dotazione in subunità gluteniniche ad alto peso molecolare determinano le proprietà reologiche dell'impasto (Shewry, 2023), oltre a misurare i parametri qualitativi che ne definiscono il valore d'uso. La valutazione della qualità tecnologica rappresenta dunque uno strumento imprescindibile per la valorizzazione di questo germoplasma e per la sua riscoperta in chiave produttiva e commerciale (Ruggeri et al., 2025).

2 SCOPO DELLA TESI

La modernizzazione della cerealicoltura, se da un lato ha garantito rese elevate e uniformi, dall'altro ha relegato ai margini un vasto patrimonio di varietà storiche di frumento tenero, oggi a rischio di scomparsa proprio quando se ne riscopre il valore genetico e culturale. In questo contesto, la caratterizzazione tecnologica rappresenta uno strumento imprescindibile per definire l'attitudine di ciascuna varietà alla trasformazione e per orientarne una corretta valorizzazione lungo la filiera.

Il presente lavoro di tesi si propone di caratterizzare, sotto il profilo tecnologico, un insieme di varietà storiche di frumento tenero (*Triticum aestivum* L.), in gran parte costituite dall'Istituto di Genetica e Sperimentazione Agraria "N. Strampelli" di Lonigo, ora CREA-DC. Il lavoro è stato svolto nell'ambito di una collaborazione avviata nel 2023 tra CREA-CI e DC, nella quale si è deciso di procedere con prove agronomiche e tecnologiche a partire da lotti di seme conservati da anni nella banca del germoplasma del CREA-DC. Il CREA- DC ha curato la moltiplicazione in campo dei materiali nelle annate 2024 e 2025 presso la località di Lonigo (VI). Il CREA-CI ha effettuato la caratterizzazione tecnologica dei lotti iniziali e dei materiali raccolti nelle annate di moltiplicazione.

I campioni di granella sono stati sottoposti a un'ampia gamma di analisi, articolate su tre livelli. Le determinazioni di base hanno riguardato il peso di mille semi, la durezza della cariosside e la resa di macinazione, unitamente alla misura dell'umidità e dell'attività alfa-amilasica mediante l'indice di caduta di Hagberg. La forza del glutine è stata stimata attraverso il volume di sedimentazione in SDS. Le proprietà reologiche degli impasti sono state infine valutate mediante prove alveografiche, che hanno fornito i parametri di tenacità, estensibilità, rapporto P/L e forza W, e mediante prove farinografiche, da cui sono stati ricavati l'assorbimento d'acqua, il tempo di sviluppo, la stabilità e il grado di rammollimento.

L'obiettivo è duplice: da un lato, descrivere il profilo qualitativo di ciascuna varietà e coglierne la variabilità in relazione al genotipo e all'annata di coltivazione; dall'altro, individuare eventuali varietà storiche dotate di caratteristiche tecnologiche di

interesse, così da fornire elementi utili alla loro valorizzazione, conservazione e reintroduzione nella filiera cerealicola.

3 MATERIALI E METODI

3.1 Materiale vegetale

Il presente studio ha riguardato un insieme di varietà storiche di frumento tenero (*Triticum aestivum* L.), costituite dall'Istituto di Genetica e Sperimentazione Agraria "N. Strampelli" di Lonigo, coltivate nelle annate 2024 e 2025 presso la località di Lonigo (VI); i campioni relativi all'annata 2023 provengono invece da seme conservato in cella frigorifera presso la banca del germoplasma dell'Istituto, e non da una coltivazione in campo di quell'anno. A tali varietà storiche sono stati affiancati alcuni testimoni commerciali moderni, impiegati come riferimento. Complessivamente sono stati caratterizzati quarantadue campioni, non tutti presenti in ciascuna annata; ventidue varietà risultano presenti in tutte e tre le annate, condizione che consente di distinguere l'effetto del genotipo da quello dell'ambiente di coltivazione. Tutte le determinazioni analitiche sono state condotte presso il laboratorio di tecnologia del CREA-CI di Vercelli (Tabella 3.1).

Tabella 3.1.

Elenco delle varietà di frumento tenero analizzate e loro presenza nelle tre annate investigate (2023, 2024, 2025); il punto indica la disponibilità del campione nell'annata corrispondente. Alle varietà storiche, in gran parte costituite dall'Istituto di Genetica di Lonigo, sono stati affiancati testimoni commerciali moderni.

Varietà	2023	2024	2025
Abbondanza		•	•
Agrella 2		•	•
Canove	•	•	
Cologna 12	•	•	
Gentil Rosso 48	•	•	
Gua' 113	•	•	
Lama	•	•	•
Lampo		•	•
Leonardo	•	•	•
Leonardo 44	•	•	•
Leone	•	•	•
Leone 129	•	•	•
Leopardo	•	•	•
Lepre	•	•	•
Libellula	•	•	•
Lince	•	•	
Liocorno	•	•	•
Lo 1014	•	•	•
Lo 12 273		•	•
Lo 17		•	•
Lo 228	•	•	•
Lo 3	•	•	•
Lo 3/58		•	•
Lo 506		•	•
Lo 510		•	•
Lo 518		•	•
Lo 523		•	•
Lo 65	•	•	•
Lonigo 1	•	•	
Lontra	•	•	•
Lucciola	•	•	•
Lupetto	•	•	•
Lupo	•	•	•
Mentana	•	•	
Piave	•	•	
Trebbo			•
Testimoni commerciali moderni			
Bologna (FF)	•	•	•
Rebelde (FF)	•	•	•
Algeri (FPS)	•	•	•
Solehio (FP)	•	•	•
Modern (FF)	•	•	•

3.1.1 Condizioni agronomiche e climatiche di coltivazione

Le condizioni agronomiche e climatiche che si descrivono fanno riferimento alle annate di raccolta 2024 e 2025, perché per l'annata 2023 i campioni vegetali provenivano da varietà storiche conservate in cella frigorifera presso l'Istituto di Genetica e Sperimentazione Agraria "N. Strampelli" di Lonigo (VI), che sono stati predisposti alle analisi nel corso del 2023 come riferimento di partenza; per questo motivo, per l'annata 2023 non sono disponibili né le condizioni agronomiche né tanto meno le condizioni pedoclimatiche.

Tanto le condizioni agronomiche quanto quelle pedoclimatiche variano tra le annate 2024 e 2025. L'operazione di presemina e semina è stata realizzata a partire dallo stesso precedente colturale, sorgo da granella, con un periodo di impianto relativamente simile: la semina è avvenuta il 20 novembre 2023 per il raccolto 2024 e il 15 novembre 2024 per il raccolto 2025, con una differenza di soli cinque giorni. La preparazione del terreno per le due annate è stata invece completamente diversa: nell'annata 2023-2024 le operazioni si sono prolungate per circa 45 giorni, dall'aratura di inizio ottobre 2023 fino a un'erpicatura finale con erpice a denti fissi effettuata a soli tre giorni dalla semina; nell'annata 2024-2025, al contrario, aratura ed erpicature si sono concentrate in un periodo di soli 9 giorni tra l'aratura del 6 novembre 2024 e la semina del 15 novembre, con due passaggi successivi di erpice rotante anziché un erpice a denti fissi nell'ultima lavorazione.

La concimazione del terreno per le due annate di raccolto è stata condotta in maniera diversa, poiché alcune sostanze sono state applicate in quantità differenti: in entrambe le annate è stato distribuito stallatico pellettato Fertilhumus alla stessa dose in peso (2000 kg/ha), seguito da un concime a base di azoto e fosforo (N-P 10-20) con microelementi (boro e zinco); la dose di quest'ultimo è risultata tuttavia superiore nell'annata 2023-2024 (535 kg/ha, pari a 53 unità/ha di azoto e 107 di fosforo) rispetto all'annata 2024-2025 (490 kg/ha, pari a 49 unità/ha di azoto e 98 di fosforo). Questo minore apporto di nutrienti nel 2024-2025 è stato successivamente compensato dalle posteriori concimazioni di copertura, tanto che l'azoto totale distribuito nell'intera annata agraria risulta più elevato nel 2024-2025 (204 unità/ha) rispetto al 2023-2024 (163 unità/ha).

3.1.2 Flusso delle analisi

La caratterizzazione tecnologica di ciascun campione si è sviluppata seguendo un iter procedurale standard che parte dalla ricezione della granella fino alla realizzazione di tutte le prove reologiche sulla farina raffinata.

Dopo la ricezione dei campioni questi sono stati suddivisi in contenitori di plastica, ciascuno con un peso di 2,7 kg. Parallelamente, per ogni campione sono stati preparati dei sacchetti di carta di piccola dimensione, nei quali sono stati posti circa 30 g di granella, destinati alle analisi fisiche semplici (peso di 1000 semi e macinazione integrale). I campioni collocati nei contenitori di plastica sono stati destinati alle analisi reologiche, previo condizionamento e macinazione. La macinazione, in entrambe le due varianti, rappresenta il passaggio fondamentale della trasformazione del frumento in sfarinati, con l'obiettivo di separare l'endosperma amilaceo della cariosside dalle parti periferiche, ottenendo il miglior rendimento possibile (Delcour & Hoseney, 2010). Lo schema complessivo del flusso di lavoro è riportato in Tabella 3.2.

Tabella 3.2.

Flusso delle analisi condotte su ciascun campione, dalla ricezione della granella alle prove reologiche sulla farina raffinata.

Fase	Procedura	Descrizione
1	Ricezione dei campioni	Accettazione della granella di frumento tenero
2	Suddivisione in aliquote	Ripartizione del campione in porzioni di lavoro
3	Peso di mille semi	Conta e pesatura delle cariossidi (contasemi Contador)
4	Macinazione integrale	Ottenimento di sfarinato integrale (mulino Cyclotec, vaglio 1 mm)
5	Falling Number	Determinazione attività alfa-amilasica su sfarinato integrale
6	Volume di sedimentazione SDS	Stima della forza del glutine su sfarinato integrale
7	NIR su sfarinato integrale	Determinazione umidità e contenuto proteico
8	Misura dell'umidità della granella	Determinazione mediante GAC, prima del condizionamento
9	Condizionamento	Idratazione della granella secondo la durezza
10	Macinazione	Ottenimento di farina, crusca e cruschello (mulino a cilindri)
11	NIR su farina raffinata	Determinazione contenuto proteico, umidità,
12	Umidità della farina	Determinazione in termobilancia (KERN DAB)
13	Alveografo	Determinazione tenacità, estensibilità, forza dell'impasto
14	Farinografo	Determinazione assorbimento idrico, tempo di sviluppo, stabilità e caduta dell'impasto

3.2 Analisi fisiche semplici

3.2.1 Peso di mille semi

Il peso di mille semi rappresenta un indice della dimensione e del riempimento della cariosside, correlato alla resa in macinazione (Wang & Fu, 2020). I campioni di granella sono stati preventivamente suddivisi in sacchetti di carta rispettivamente identificati con il nome originale riportato sulla confezione arrivata in laboratorio (nome e anno). La determinazione è stata eseguita sulla granella tal quale, così come pervenuta in laboratorio, prima di qualunque trattamento di condizionamento. Per il conteggio è stato impiegato un contasemi automatico Contador (Pfeuffer); per ciascun campione sono state selezionate esclusivamente le cariossidi integre, contando e pesando due aliquote di 100 semi ciascuna (Figura 3.1). Il valore medio è stato successivamente rapportato a 1000 semi ed espresso in grammi (Delcour & Hoseney, 2010).

Figura 3.1 - Contasemi automatico Contador (Pfeuffer) impiegato per la conta delle cariossidi nella determinazione del peso di 1000 semi.

3.2.2 Macinazione integrale

Per ciascun campione è stata prelevata un'aliquota di granella corrispondente a un peso di circa 30 g, macinata mediante mulino a ciclone Cyclotec™ 1093 (*Foss Tecator*), equipaggiato con una griglia dotata di vaglio da 1 mm, in grado di ridurre le cariossidi a uno sfarinato integrale di granulometria fine e uniforme (Figura 3.2). Lo sfarinato così ottenuto è stato conservato in apposite buste fino al momento delle determinazioni. Su questa frazione sono state condotte le analisi del Falling Number, del volume di sedimentazione in SDS e la lettura NIR (Delcour & Hoseney, 2010).

Figura 3.2 – Mulino a ciclone Cyclotec™ 1093 (Foss Tecator), impiegato per la produzione dello sfarinato integrale.

3.2.3 Falling Number

Il *Falling Number*, o indice di Hagberg-Perten, è stato determinato secondo il metodo viscosimetrico descritto nel paragrafo 1.5.3.2 (ICC, 1995), basato sulla gelatinizzazione a 100°C di una sospensione di acqua e farina e sulla successiva idrolisi dell'amido da parte dell'alfa-amilasi presente nel campione.

Esecuzione del test: per la prova sono stati pesati 7 g di sfarinato integrale, addizionati di 25 mL di acqua distillata all'interno dell'apposito tubo viscosimetrico. Il tubo è stato agitato vigorosamente fino a ottenere una sospensione omogenea, avendo cura di recuperare e reincorporare l'eventuale campione adeso alle pareti. Il tubo, unitamente al proprio agitatore, è stato quindi immerso nel bagno di acqua bollente di cui è dotato lo strumento; trascorsi cinque secondi, lo strumento avvia automaticamente l'agitazione della sospensione. Per effetto del riscaldamento della sospensione di acqua e sfarinato a 100°C si verifica la gelatinizzazione dell'amido, seguita dalla sua idrolisi da parte dell'alfa-amilasi contenuta nel campione. Tanto maggiore è la presenza di amilasi, tanto più rapidamente l'amido viene degradato: la viscosità del gel risulta di conseguenza inferiore, consentendo all'agitatore di discendere più velocemente e determinando un numero di caduta minore. Al termine dell'agitazione, l'agitatore viene lasciato scendere per gravità attraverso la sospensione

gelatinizzata e il sistema arresta il conteggio nel momento in cui raggiunge la posizione prestabilita, registrando il numero di caduta in secondi (Figura 3.3) (ICC, 1995).

Figura 3.3 - Determinazione del *Falling Number*: (a) apparecchio Perten per la misura del numero di caduta; (b) tubo viscosimetrico con la sospensione di sfarinato e acqua distillata; (c) rastrelliera con i tubi predisposti per l'analisi.

3.2.4 Volume di sedimentazione in SDS

Il volume di sedimentazione in SDS è un *test* quantitativo eseguito per la valutazione dell'attitudine panificatoria delle farine. Il *test* si basa sul principio per cui le proteine del glutine (gliadine e glutenine) rigonfiano e flocculano in una soluzione debolmente acida, in presenza di sodio dodecil solfato (SDS) e acido lattico, come descritto di seguito. La tecnica misura il volume del sedimento che si forma dopo un intervallo di tempo prestabilito: un volume maggiore di sedimento corrisponde a una farina di qualità superiore. L'esecuzione del test richiede una piccola quantità di campione, è estremamente semplice, affidabile e possiede una buona corrispondenza con diverse prove reologiche (Preston et al., 1982).

Preparazione delle soluzioni: per la soluzione di SDS al 2% sono stati pesati 20 g di sodio dodecil solfato puro, disciolti in acqua distillata e portati a un volume finale di 1 L. Per la soluzione di acido lattico sono stati prelevati 10 mL di acido lattico (88–90%) e miscelati con 80 mL di acqua distillata, per un totale di 90 mL. Infine, per ottenere la soluzione di lavoro, sono stati aggiunti 20 mL della soluzione di acido lattico all'intero litro di soluzione di SDS, ottenendo un volume complessivo di 1020 mL.

Esecuzione del test: la prova è stata condotta sullo sfarinato integrale, ottenuto mediante mulino Cyclotec come descritto in precedenza. Tra i campioni analizzati è stato incluso un testimone a volume di sedimentazione noto, impiegato come riferimento di controllo per verificare l'attendibilità della prova. L'analisi è stata eseguita utilizzando cilindri graduati da 10 mL, uno per ciascun campione, ognuno dotato di tappo e sistema di aspirazione (Figura 3.4); per garantire l'accuratezza dei tempi è stato impiegato un cronometro. In ciascun cilindro sono stati dapprima misurati 5 mL di acqua distillata, seguiti dall'aggiunta di 0,5 g del rispettivo sfarinato. Chiuso il cilindro, è stato avviato il conteggio del tempo e la sospensione è stata agitata vigorosamente, capovolgendola 15 volte, prima di essere riposta in posizione verticale. La stessa operazione è stata ripetuta al compimento del 2° minuto, per assicurare una corretta miscelazione. In prossimità del 4° minuto, esattamente a 3 minuti e 45 secondi, la sospensione è stata nuovamente agitata per 15 volte e sono stati quindi aggiunti 5 mL della soluzione di lavoro. Il cilindro è stato richiuso e capovolto delicatamente quattro volte, quindi riposto in verticale; per garantire una miscelazione completa, i capovolgimenti delicati sono stati ripetuti al 6°, all'8° e al 10° minuto.

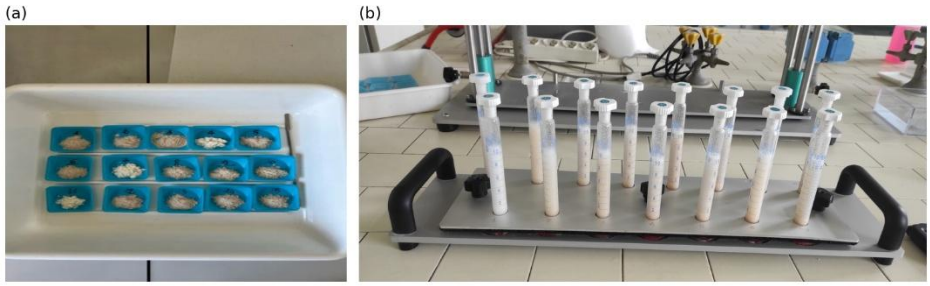

Figura 3.4 - Analisi del volume di sedimentazione in SDS: (a) aliquote di 0,5 g di sfarinato integrale pesate per ciascun campione; (b) rastrelliera con i cilindri graduati predisposti per l'analisi, con lo sfarinato in fase di sedimentazione.

Trascorso l'intero periodo di sedimentazione di 25 minuti, il volume finale è stato letto direttamente sulle tacche del cilindro (Figura 3.5). Il valore ottenuto è stato infine moltiplicato per 10, così da esprimere il volume di sedimentazione rispetto a 100 mL di soluzione e consentire il confronto tra tutti i campioni (Preston et al., 1982).

Figura 3.5 - Lettura del volume di sedimentazione in SDS: il livello del sedimento, variabile nei diversi cilindri, è misurato direttamente sulla scala graduata.

3.2.5 Analisi composizionali (NIR): contenuto proteico e parametri qualitativi dello sfarinato integrale

Il contenuto proteico, l'umidità e il tenore in ceneri dello sfarinato integrale sono stati determinati mediante spettroscopia nel vicino infrarosso, una tecnica di tipo vibrazionale che sfrutta l'interazione tra le radiazioni elettromagnetiche nella regione del vicino infrarosso e i gruppi funzionali della sostanza organica. È stato impiegato un analizzatore FOSS Infratec™ (FOSS Analytical A/S, Hillerød, Danimarca), operante in trasmittanza nel vicino infrarosso (NIT, *Near-Infrared Transmittance*) (Figura 3.6). La tecnica presenta il vantaggio di essere rapida, non distruttiva e non invasiva, consentendo la determinazione simultanea di più parametri a partire da una singola lettura, senza pretrattamento del campione.

Il contenuto proteico viene restituito dallo strumento sul campione tal quale e, sulla base dell'umidità rilevata nella stessa lettura, infine il valore viene espresso in percentuale sulla sostanza secca (Manley, 2014). Questo valore rappresenta uno dei principali indicatori della qualità tecnologica e nutrizionale del frumento, dato che le proteine di riserva della cariosside (gliadine e glutenine) determinano in gran parte l'attitudine panificatoria della farina (Khalid et al., 2023). Si tratta di un carattere influenzato dal genotipo del frumento, dall'andamento climatico, dalla disponibilità idrica e di sostanze nutritive. I valori possono variare in una percentuale che oscilla generalmente tra il 9 e il 15% riferito alla sostanza secca (Elbasyoni et al., 2018).

Un parametro che incide molto sulle modalità di conservazione di questi sfarinati è l'umidità, che oltre ad essere necessaria per esprimere il contenuto proteico su base secca, costituisce un parametro determinante per la conservabilità dello sfarinato:

bassi valori di umidità rallentano la respirazione e lo sviluppo di microrganismi, prolungando la *shelf life* del prodotto (Nasir et al., 2003).

Infine, il contenuto in ceneri dello sfarinato integrale, esprime la quantità di minerali (calcio, magnesio, fosforo, potassio, ferro, zinco, rame) apportata dagli strati di crusca e dal germe, situazione totalmente diversa da quanto avviene nella farina raffinata che è carente di strati cruscali (Wu et al., 2026).

Figura 3.6 - Analizzatore FOSS Infratec™ impiegato per la determinazione dei parametri qualitativi in trasmittanza nel vicino infrarosso.

3.3 Analisi tecnologiche complesse

3.3.1 Determinazione dell'umidità e condizionamento

Il condizionamento rappresenta la fase preliminare indispensabile alla macinazione raffinata, necessaria a portare la granella all'umidità finale prevista in funzione della durezza. Durante questa procedura la granella viene portata a un tenore di umidità prestabilito così da facilitare il distacco degli involucri esterni dall'endosperma e favorirne la successiva separazione. L'idratazione ammorbidisce gli strati cruscali, ne aumenta la tenacità e riduce allo stesso tempo la resistenza dell'endosperma amilaceo, migliorando la resa e la purezza della farina (Delcour & Hoseney, 2010).

Prima di procedere al condizionamento è imprescindibile misurare l'umidità della granella. Questa misura è stata eseguita con l'utilizzo di un analizzatore GAC (*Grain Analysis Computer*), strumento che fornisce una lettura rapida e automatizzata del tenore di umidità (Figura 3.7). La determinazione è stata condotta in due momenti distinti: prima del condizionamento, per calcolare la quantità di acqua da aggiungere,

e dopo il riposo, per verificare il raggiungimento dell'umidità target (Delcour & Hoseney, 2010).

Figura 3.7 - Analizzatore GAC *(Grain Analysis Computer)* impiegato per la misura dell'umidità della granella prima e dopo il condizionamento.

Noto il valore di umidità iniziale, la quantità di acqua distillata da aggiungere è stata calcolata in funzione di una tabella di riferimento: incrociando la percentuale di umidità iniziale della granella con la percentuale di umidità target desiderata, tale incrocio forniva il valore specifico, espresso in millilitri d'acqua, da aggiungere per unità di quantità di granella standard (ad esempio 1000 g di granella) con la finalità di raggiungere l'umidità desiderata. Le varietà a granella *soft* devono essere portate a un'umidità del 14,5%, quelle *medium* al 16,0% e quelle *hard* al 16,5%, con tempi di riposo di 24, 36 e 48 ore rispettivamente (Tabella 3.3).

Dopo l'aggiunta della quantità d'acqua necessaria, la granella è stata lasciata a riposo per il tempo riportato in Tabella 3.3 in appositi contenitori, periodicamente agitati per garantire l'uniforme distribuzione dell'umidità e successivamente sottoposta a macinazione

Tabella 3.3.

Parametri di condizionamento della granella in funzione della classe di durezza.		
Classe di durezza	**Tempo di condizionamento (h)**	**Umidità finale (%)**
Soft	24	14,5
Medium	36	16,0
Hard	48	16,5

3.3.2 Macinazione raffinata

Dopo il condizionamento dei campioni di granella, si procede alla fase di macinazione vera e propria. Per ottenere la farina raffinata è stato utilizzato un mulino a cilindri, in grado di restituire tre frazioni: farina, crusca e cruschello, separate mediante appositi vagli. Il processo si articola in una prima fase di rottura, in cui i cilindri aprono la cariosside e ne rimuovono l'endosperma, e in una successiva fase di rimacina, nella quale i cilindri lisci riducono progressivamente i frammenti di endosperma a farina di granulometria fine (Delcour & Hoseney, 2010). Dopo questo passaggio la farina viene convogliata verso una macchina setacciatrice, dove un setaccio rotante con differenti maglie separa le particelle di dimensioni simili (Figura 3.8).

Alla fine di ogni processo di macinazione, ogni campione di granella è stato posto in un sacchetto di plastica, debitamente identificato con il nome della linea di frumento e l'annata, successivamente, chiuso e conservato in cella frigorifera, fino al momento delle successive prove reologiche e delle analisi composizionali (NIR).

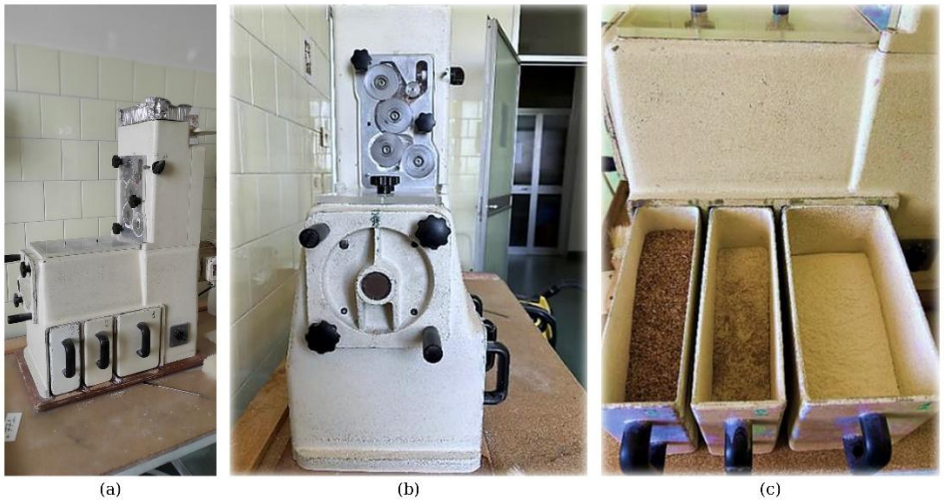

Figura 3.8 - Mulino a cilindri impiegato per la macinazione raffinata: (a) veduta laterale con i cassetti di raccolta delle frazioni; (b) veduta frontale del gruppo dei cilindri; (c) le tre frazioni ottenute: crusca, cruschello e farina raffinata.

3.3.3 Resa di macinazione

La resa di macinazione rappresenta un parametro tecnologico di rilievo poiché è direttamente correlata alla redditività industriale della varietà. Si tratta di un carattere complesso, influenzato dalla durezza della cariosside, dal grado di adesione tra endosperma e crusca, dalla pienezza della cariosside e dal rapporto tra endosperma e crusca, fattori che condizionano la facilità di separazione delle due componenti durante la macinazione (Ji et al., 2020).

La resa di macinazione è stata calcolata come percentuale di farina raffinata ottenuta rispetto alla quantità totale di prodotto recuperato (farina, cruschello e crusca) dopo la macinazione.

3.3.4 Analisi composizionali (NIR): contenuto proteico e parametri qualitativi della farina raffinata

Sulla farina raffinata, analogamente a quanto descritto per lo sfarinato integrale nel paragrafo 3.2.5, sono stati determinati mediante spettroscopia nel vicino infrarosso l'umidità, il contenuto proteico e le ceneri.

Il tenore in ceneri rappresenta un indicatore del grado di raffinazione della farina e della contaminazione da frazioni cruscali residue: i valori aumentano proporzionalmente alla quantità di particelle di crusca presenti nella farina (Kim & Flores, 1999). Dal punto di vista applicativo, la sua determinazione costituisce uno strumento di controllo di processo nell'industria molitoria, impiegato per monitorare la purezza delle diverse frazioni ottenute durante la macinazione e per selezionare i flussi di farina più idonei alle diverse destinazioni d'uso (Sakhare & Inamdar, 2014). È proprio questo parametro su cui si basa la classificazione merceologica delle farine di frumento tenero (tipo 00, 0, 1, 2, integrale) prevista dal D.P.R. n. 187/2001.

3.3.5 Analisi reologiche: alveografo e farinografo

Le analisi reologiche sono state condotte sulla farina raffinata, ottenuta dalla macinazione dei campioni, al fine di valutarne il comportamento fisico durante le fasi di impastamento e lavorazione, aspetto strettamente correlato all'attitudine tecnologica della varietà alla panificazione (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

Poiché i principali parametri reologici sono influenzati dal contenuto di umidità del campione, prima di procedere alle prove alveografiche e farinografiche è stata preliminarmente determinata l'umidità della farina, dato necessario per entrambe le determinazioni.

3.3.5.1 Umidità della farina

L'umidita della farina raffinata è stata misurata utilizzando un analizzatore di umidità KERN DAB (Figura 3.9). Tale strumento è una termobilancia a raggi infrarossi alogena, che determina l'umidità di un campione paragonando il suo peso prima e dopo il riscaldamento: la differenza di peso registrata corrisponde alla quantità di umidità. Il meccanismo di funzionamento si basa sul fatto che la radiazione emessa dalla lampada alogena penetra direttamente nel campione e questa si trasforma in energia termica: il riscaldamento procede quindi in direzione opposta, dall'interno verso l'esterno. Una quota della radiazione incidente viene riflessa dal campione, e la profondità di penetrazione della radiazione dipende dalla permeabilità del campione stesso. Questo meccanismo della termobilancia è molto più veloce rispetto agli essiccatori tradizionali di laboratorio (Kern & Sohn GmbH, 2016).

Preparazione: un'aliquota di farina raffinata, compresa tra 2,5 e 3 g, è stata prelevata da ciascun campione e distribuita in modo uniforme sul piattino in alluminio della termobilancia KERN DAB, avendo cura di formare uno strato sottile e omogeneo così da favorire un'essiccazione uniforme del campione.

Esecuzione del test: il piattino contenente il campione è stato posizionato all'interno della termobilancia, impostata a una temperatura di essiccamento di 105°C. Lo strumento ha effettuato il riscaldamento del campione registrando in continuo la perdita di peso, fino al raggiungimento di un peso costante, condizione che determina l'arresto automatico della prova. Al termine del ciclo lo strumento ha restituito in automatico il valore percentuale di umidità del campione, calcolato come rapporto tra la perdita di peso registrata e il peso iniziale del campione. Il dato di umidità così ottenuto è stato successivamente utilizzato per l'espressione dei risultati delle prove alveografiche e farinografiche.

Figura 3.9 - Termobilancia KERN DAB utilizzata per la determinazione dell'umidità della farina raffinata, con visualizzazione del valore percentuale a fine ciclo di essiccamento.

3.3.5.2 Alveografo

Preparazione: la prova alveografica è stata condotta secondo il metodo standard ICC 121/2 (ICC 121/2, 1992), impiegando l'Alveografo Chopin abbinato all'unità di acquisizione Alveolink NG (Figura 3.10). Per ciascun campione sono stati pesati 250 g di farina raffinata, ai quali è stata aggiunta, tramite buretta collegata all'impastatrice, una soluzione acquosa di NaCl al 2,5% (25 g di NaCl in 1 L di acqua), il cui volume è stato corretto in funzione dell'umidità della farina, precedentemente determinata mediante termobilancia come descritto nel paragrafo 3.4.4.1. L'impastamento ha avuto una durata complessiva di 8 minuti: al primo, al terzo e al sesto minuto è stato temporaneamente interrotto per rimuovere con una spatola i residui di impasto aderenti alle pareti dell'impastatrice e reincorporarli alla massa, approfittando di queste pause anche per oliare gli accessori destinati all'estrusione. Al termine dell'ottavo minuto è stata aperta l'apertura di estrusione e, con l'ausilio di coltello e spatola, è stato estruso e scartato il primo centimetro di impasto; la striscia successiva è stata suddivisa in cinque porzioni. Ciascuna porzione è stata posta sulla piastra di laminazione e ridotta a sfoglia di spessore uniforme mediante dodici passaggi del rullo, dopodiché è stato ricavato un disco con l'apposito tagliapasta, eliminando l'impasto in eccesso (Figura 3.10). Ogni disco è stato immediatamente trasferito su una

piastra di riposo e collocato nella camera di riposo per i restanti 20 minuti, fino al raggiungimento del ventottesimo minuto complessivo dall'inizio dell'impastamento; l'operazione è stata ripetuta per tutte e cinque le porzioni. Nell'intervallo di riposo dei dischi è stata inoltre effettuata la pulizia dell'impastatrice, rimuovendo la flangia, i residui di impasto e la lama, che sono stati lavati e risciacquati con cura; la vaschetta di impastamento è stata pulita con un panno in microfibra, dopodiché ogni componente è stato asciugato e riposizionato, in modo da predisporre lo strumento per l'analisi successiva. Al ventottesimo minuto ha avuto inizio la prova vera e propria.

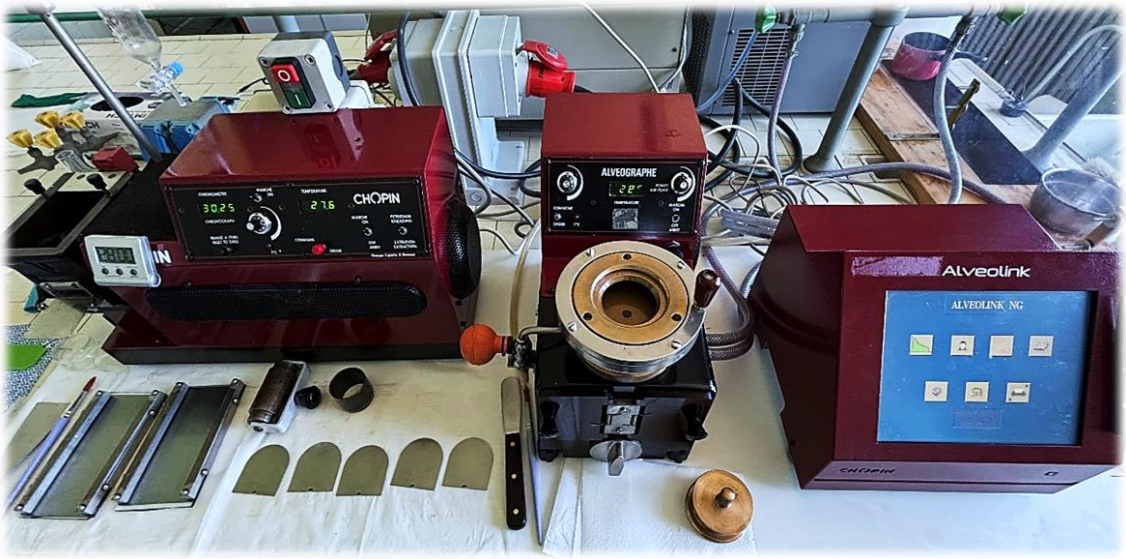

Figura 3.10 - Strumentazione impiegata per la prova alveografica: impastatrice Chopin, Alveografo e unità di acquisizione Alveolink NG, con gli utensili per la preparazione delle sfoglie di pasta (piastre di laminazione, tagliapasta, dischi da cinque pezzi).

Esecuzione del test: ciascun disco è stato posizionato in sequenza sulla piastra alveografica, anch'essa rivestita di olio di paraffina, e bloccato mediante l'apposito coperchio. Un flusso d'aria a pressione controllata ne ha determinato il progressivo rigonfiamento fino alla formazione di una bolla (Figura 3.11), la cui deformazione è stata registrata in continuo dallo strumento sotto forma di curva alveografica, fino al punto di rottura, rilevato automaticamente. La prova è stata ripetuta sui cinque dischi e i risultati sono stati espressi come media delle cinque curve ottenute (alveogramma). Dalla curva sono stati ricavati i principali parametri reologici, già descritti nel paragrafo 1.5.4.2: la tenacità P, l'estensibilità L, l'indice di rigonfiamento G, la forza della farina W e il rapporto di configurazione P/L (ICC 121/2, 1992).

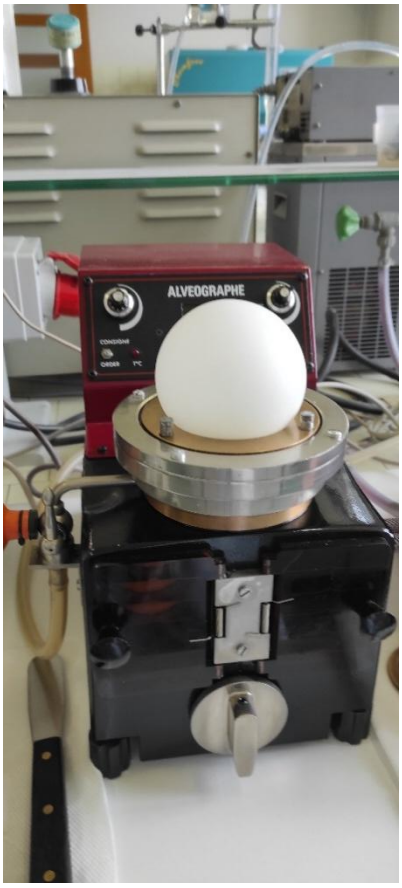

Figura 3.11 - Fase di gonfiaggio della sfoglia di pasta nella camera di prova dell'Alveografo Chopin, con formazione della bolla fino al punto di rottura.

A titolo esemplificativo, la Figura 3.12 riporta un alveogramma ottenuto da uno dei campioni testimone (Modern, frumento biscottiero)), con il tracciato della curva di rigonfiamento e i relativi parametri (P, L, G, W, P/L) restituiti automaticamente dal software Alveolink.

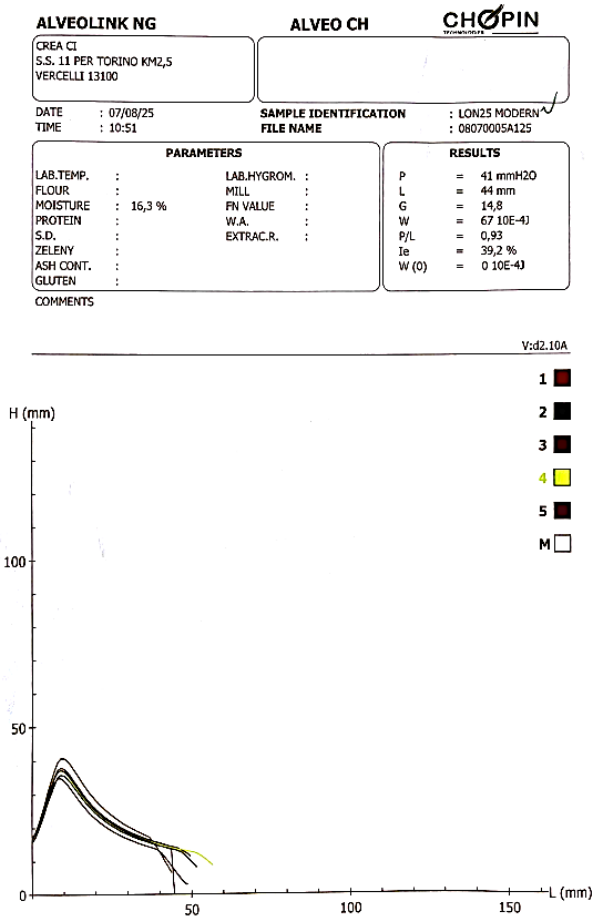

Figura 3.12 - Esempio di referto alveografico, con il tracciato della curva di rigonfiamento e i parametri reologici calcolati automaticamente dallo strumento.

3.3.5.3 Farinografo

Preparazione: la prova farinografica è stata condotta secondo il metodo standard ICC n. 115/1; ISO 5530-1 (ICC 115/1, 1992), impiegando il Farinografo di Brabender (Figura 3.13), costituito da un'impastatrice in ghisa al cui interno ruotano due pale che formano l'impasto, collegata a un termostato in grado di mantenere costante la temperatura per l'intera durata dell'analisi; al di sopra dell'impastatrice è posizionata una buretta contenente acqua distillata, aggiunta progressivamente alla farina, mentre un software collegato allo strumento registra in continuo il farinogramma. Per ciascun campione sono stati inseriti nell'impastatrice circa 300 g di farina raffinata, con temperatura mantenuta a 30°C e velocità di rotazione delle pale pari a 63 giri/min; l'assorbimento d'acqua è stato riferito a un contenuto di umidità della farina del 15%.

Figura 3.13 - Farinografo di Brabender impiegato per la determinazione delle proprietà reologiche dell'impasto: impastatrice in ghisa, buretta per l'aggiunta dell'acqua distillata e termostato di regolazione della temperatura.

Per ciascun campione sono state condotte due prove distinte: nella prima, l'acqua distillata è stata aggiunta gradualmente all'impasto fino al raggiungimento di una consistenza di 500 UB, valore convenzionalmente definito come consistenza ottimale; nella seconda, dopo aver accuratamente ripulito lo strumento, è stato aggiunto rapidamente il quantitativo di acqua corretto, indicato dal software del farinografo sulla base della prima prova, necessario al raggiungimento dei 500 UB, lasciando quindi proseguire l'analisi. In entrambi i casi la prova si è conclusa al compimento del ventesimo minuto dall'inizio della registrazione. Ai fini della validità della prova, il picco massimo del farinogramma doveva corrispondere al valore di 500 UB sull'asse delle ordinate.

Parametri ottenuti: dal farinogramma sono stati ricavati i principali parametri reologici, già introdotti nel paragrafo 1.5.4.1: il tempo di sviluppo, corrispondente al tempo impiegato dall'impasto per raggiungere la consistenza di 500 UB; la stabilità,

ossia il tempo durante il quale la consistenza dell'impasto si è mantenuta a 500 UB; il grado di caduta (o di rammollimento), calcolato come differenza tra la consistenza massima di 500 UB e quella registrata al ventesimo minuto dall'inizio della prova; e l'assorbimento idrico, espresso come quantità percentuale di acqua necessaria a raggiungere la consistenza di 500 UB (ICC 115/1, 1992).

La Figura 3.14 mostra, a scopo illustrativo, il farinogramma di uno dei campioni analizzati, con il tracciato della curva di consistenza e i principali parametri restituiti automaticamente dal software dello strumento.

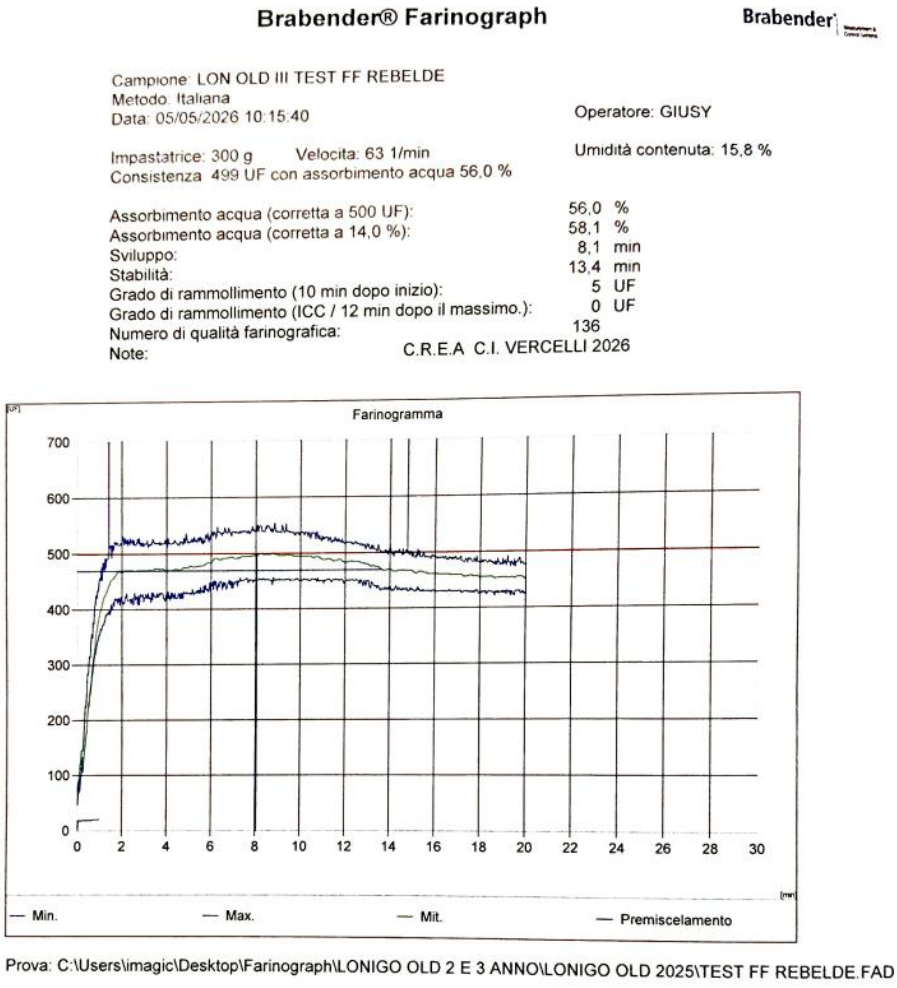

Figura 3.14 - Esempio di referto farinografico generato dal software del Farinografo di Brabender, con il tracciato della curva di consistenza e i parametri reologici calcolati automaticamente dallo strumento.

3.4 Analisi statistica

Le analisi statistiche sono state condotte con il *software* jamovi (The jamovi project, 2025), basato su R (R Core Team, 2025); il *test* di omogeneità delle varianze (Levene) è stato calcolato tramite il pacchetto car (Fox & Weisberg, 2019).

Per ogni parametro tecnologico sono stati preliminarmente verificati i presupposti di normalità dei residui, attraverso il *test* di Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), e di omogeneità delle varianze, tramite il *test* di Levene (Levene, 1960). Il confronto tra varietà e annata è stato condotto tramite analisi della varianza (ANOVA) a una via o a due vie, a seconda del disegno sperimentale del singolo parametro. Nei casi in cui l'assunzione di normalità non fosse rispettata, è stato utilizzato il *test* non parametrico di Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952). Nei casi di eterogeneità delle varianze è stata invece applicata l'ANOVA robusta di Welch (Welch, 1951).

Infine, per i confronti multipli *post-hoc* è stato impiegato il *test* di Tukey (HSD) (Tukey, 1949) in caso di ANOVA parametrica, e il *test* di Dunn con correzione di Bonferroni (Dunn, 1964) in caso di test non parametrico. La soglia di significatività è stata fissata a $p<0,05$ per tutte le analisi.

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Caratterizzazione qualitativa

I risultati completi relativi alle analisi tecnologiche semplici (peso di mille semi, classe di durezza della cariosside, contenuto proteico (NIR), volume di sedimentazione SDS, Falling Number) e complesse (farinografo e alveografo) sono riportati in appendice nelle Tabelle 8.1, 8.2 e 8.3, comprensive anche delle 5 varietà testimoni, utilizzate come riferimento descrittivo. I test statistici (ANOVA e confronti post-hoc) presentati nei paragrafi seguenti sono stati condotti esclusivamente sulle 17 varietà storiche comuni alle annate considerate, escludendo le varietà testimoni

4.2 Analisi tecnologiche semplici

4.2.1 Peso di mille semi (Thousand Kernel Weight, TKW)

La valutazione di questo parametro è stata limitata alle annate 2024 e 2025, non essendo disponibile il dato per il 2023, considerando le varietà comuni presenti nelle due annate menzionate. I risultati dell'ANOVA, riportati nella Tabella 4.1, evidenziano differenze significative sia tra varietà che tra annate di coltivazione.

Tabella 4.1.

Analisi della varianza a due vie (Varietà + Annata), condotta sulle 17 varietà storiche comuni alle annate 2024 e 2025.

Fonte di variazione	**Somma quadrati**	**gdl**	**Media quadratica**	**F**	**p**
Varietà	214,5	16	13,41	3,82	0,005***
Annata	75,6	1	75,6	21,53	<0,001***
Residui	56,2	16	3,51	-	-

* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; n.s.: non significativo.

Nella Figura 4.2 è illustrata mediante *boxplot* la distribuzione del carattere TKW nelle due annate sperimentali, che consente di visualizzare la posizione centrale dei dati, la dispersione e gli eventuali *outlier*. Come si può osservare, emerge una distribuzione dei valori mediamente più elevata nel 2025 (45,6g) rispetto al 2024 (42,6g), accompagnata da una maggiore variabilità tra le varietà. Per quanto riguarda le varietà, quella che

ha evidenziato il peso medio più basso è stata Leone 129 (39,5g), mentre il valore più alto è stato registrato in Lupo (50,0g).

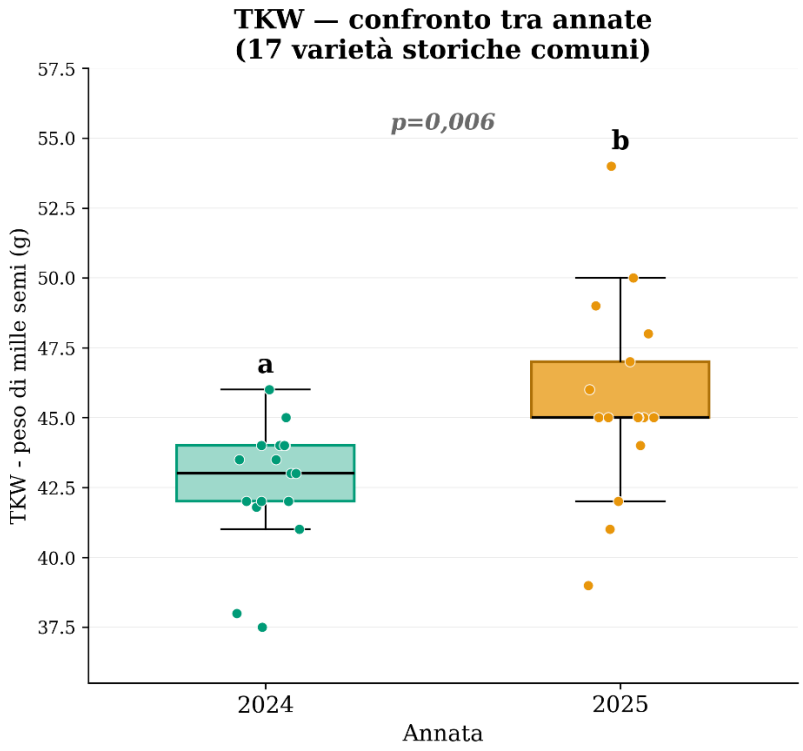

Figura 4.1 *- "TKW* - peso di mille semi (g) nelle 17 varietà storiche, confronto tra le annate 2024 e 2025; lettere diverse sopra i box indicano una differenza statisticamente significativa (p=0,006).

L'aumento del TKW registrato nell'annata 2025 può essere ricondotto a una combinazione di condizioni favorevoli che si sono verificate a partire dal periodo di presemina e semina, insieme all'andamento delle condizioni meteorologiche nel corso del ciclo colturale (Figura 4.2). Il mese di maggio, corrispondente alla fase di fioritura e all'avvio del riempimento della cariosside (Zadoks et al., 1974), mostra un pattern completamente diverso nelle due annate: nel 2024 sono stati registrati 232,2 mm di pioggia, contro soli 84,4 mm nel 2025. Le abbondanti precipitazioni di maggio 2024 potrebbero aver causato fenomeni di stress idrico da ristagno, limitando così l'accumulo di sostanza secca (amido) nella cariosside (Ma et al., 2022). Inoltre, queste condizioni di elevata umidità in prossimità della fioritura favoriscono l'insorgenza di patogeni fungini della spiga, in particolare la fusariosi (Matengu et al., 2024). Questa condizione potrebbe spiegare, almeno in parte, il TKW più basso registrato per l'annata di raccolta 2024 rispetto a quella del 2025.

Infine, la fase di maturazione della cariosside, corrispondente al mese di giugno, è risultata più calda nel 2025 (temperatura media 25,2°C) rispetto al 2024 (23,0°C), con minore quantità di pioggia (71,8 mm contro 118,6 mm). Nonostante le temperature elevate durante il riempimento della cariosside siano generalmente associate a una riduzione del TKW, per accorciamento della fase di accumulo di amido e per il calo della capacità fotosintetica (Djanaguiraman et al., 2020), in questo caso l'effetto non sembra aver influito negativamente, probabilmente perché la fase di riempimento più critica si fosse già ampiamente svolta nelle settimane precedenti, in condizioni climatiche più favorevoli.

Va inoltre ricordato che la concimazione tra le due annate di raccolto è stata condotta in maniera diversa: nell'annata 2024-2025 le concimazioni di copertura azotate hanno determinato un apporto totale di azoto superiore rispetto alla 2023-2024, come descritto nel paragrafo 3.1.1.

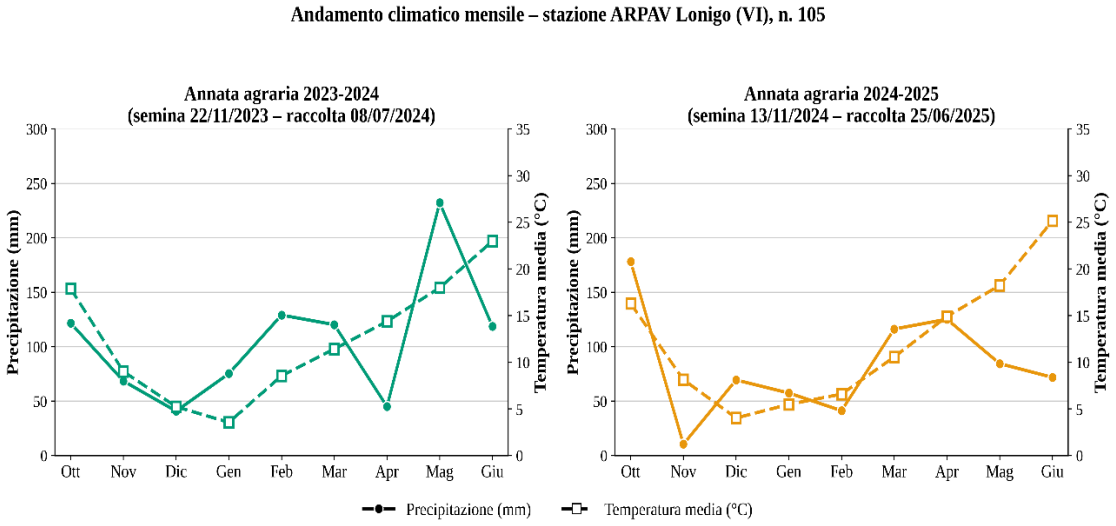

Figura 4.2 - Andamento climatico mensile (ottobre-giugno), stazione ARPAV di Lonigo (VI), n. 105, a confronto tra le due annate agrarie: a sinistra il 2023-2024 (semina 22/11/2023, raccolta 08/07/2024), a destra il 2024-2025 (semina 13/11/2024, raccolta 25/06/2025). Linea continua: precipitazione mensile (mm); linea tratteggiata: temperatura media mensile (°C).

4.2.2 Hardness

Dai risultati riportati nelle Tabelle 8.1, 8.2 e 8.3 emerge una netta prevalenza della classe *soft* in tutte e tre le annate, con percentuali comprese tra il 60,0% del 2023, il 77,5% del 2024 e il 70,6% del 2025. Nessuna delle varietà analizzate rientra nella classe *hard*. Sebbene la durezza della cariosside sia un carattere prevalentemente

determinato geneticamente, i risultati ottenuti evidenziano una certa variabilità della texture tra gli anni di prova. Alcune accessioni storiche classificate come *soft* in una stagione sono infatti risultate *medium* in altre. Tale comportamento suggerisce che fattori ambientali e l'interazione genotipo-ambiente influenzino l'espressione fenotipica del carattere, modificandone la classificazione pur in presenza dello stesso patrimonio genetico (Bergman et al., 1998).

4.2.3 Contenuto proteico

Il contenuto proteico è stato determinato mediante spettroscopia NIR su entrambe le frazioni ottenute dal processo di macinazione: lo sfarinato integrale descritto nel paragrafo 3.2.5, e la farina raffinata, descritta nel paragrafo 3.3.4.

L'analisi statistica su questi parametri è stata condotta confrontando le tre annate di coltivazione (2023, 2024, 2025) e le 17 varietà storiche comuni alle tre annate, per un totale di 51 osservazioni per ciascun parametro.

Per la caratterizzazione del contenuto proteico, determinato separatamente su sfarinato integrale e su farina raffinata, è stata condotta per le tre annate un'ANOVA a due vie (Tabella 4.2), utilizzando il modello additivo con i soli due effetti principali, varietà e annata: poiché è disponibile una sola osservazione per ciascuna combinazione varietà * annata, il modello è privo di replicazione e il termine di interazione varietà * annata non è stimabile separatamente dall'errore residuo.

Come si può osservare in Tabella 4.2, per lo sfarinato integrale si è osservata una differenza significativa tra gli anni di prova, ma non tra le varietà.

Per la farina, invece, l'analisi statistica ha evidenziato differenze significative sia tra le annate sia tra le varietà.

Considerando la media del triennio 2023-2025 per ciascuna delle 17 varietà storiche, nello sfarinato integrale il contenuto proteico più basso è stato osservato in **Lupetto** (12,2%), mentre il più elevato è stato riscontrato in **Lo 228** (13,9%). Nella farina, i valori medi più bassi sono stati registrati in **Lepre** e **Lupetto** (10,6% per entrambe le varietà), mentre il valore più elevato è risultato ancora una volta in **Lo 228** (12,9%). Tale variabilità è coerente con la significatività dell'effetto varietà riscontrata per questo parametro nello sfarinato integrale.

Tabella 4.2 .

Analisi della varianza a due vie (Varietà + Annata), 17 varietà storiche comuni alle tre annate (51 osservazioni per frazione).						
Frazione	**Fonte di variazione**	**Somma dei Quadrati**	**gdl**	**Media Quadratica**	**F**	**p**
Integrale	**Varietà**	10,64	16	0,67	1,29	0,265 (ns)
	Annata	14,48	2	7,24	13,99	<0,001***
	Residui	16,56	32	0,52	-	-
Farina	**Varietà**	15,24	16	0,95	2,69	0,008**
	Annata	13,04	2	6,52	18,42	<0,001***
	Residui	11,32	32	0,35	-	-

* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; n.s.: non significativo.

Per quanto riguarda le annate di prova (Figura 4.3), il contenuto proteico nel 2023 è stato il più elevato. Il 2024 ha presentato invece il contenuto proteico più basso, significativamente inferiore a entrambe le altre annate, mentre il 2025 ha mostrato un contenuto proteico anch'esso elevato, non significativamente diverso dal 2023 ma significativamente superiore al 2024.

.

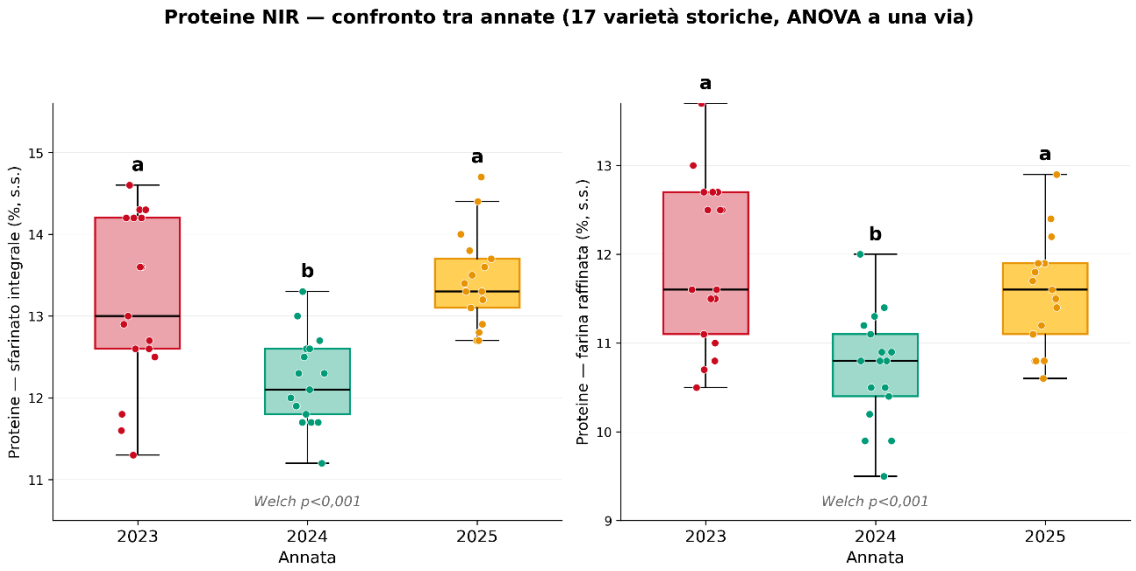

Figura 4.3 - Confronto del contenuto proteico determinato mediante NIR, su sfarinato integrale e su farina raffinata, tra le tre annate investigate (2023-2025), nelle 17 varietà storiche. Lettere diverse sopra *i box* indicano differenze statisticamente significative tra le annate (ANOVA a una via di Welch e *post-hoc* di Games-Howell); annate contrassegnate dalla stessa lettera non differiscono significativamente tra loro.

Per le due annate di prova effettiva di campo (2024 e 2025) disponiamo dei dati reali della stazione ARPAV di Lonigo (VI) n. 105 e delle relazioni agrometeorologiche CREA (stazione di riferimento Ceregnano, RO). Giugno 2025 è stato nettamente più caldo e più secco di giugno 2024 (71,8 mm e 25,2°C contro 118,6 mm e 23,0°C), con temperature sopra la media già dalla prima metà di maggio: la relazione CREA attribuisce a queste temperature elevate un anticipo della maturazione della cariosside. Il 2024, al contrario, ha avuto un periodo primaverile-estivo con piovosità abbondante e temperature nella norma, condizioni descritte dalla stessa relazione CREA come favorevoli alle fasi di levata, spigatura e riempimento della cariosside. Questo andamento è coerente con la nota relazione inversa che lega la resa e la concentrazione proteica del frumento: quando l'amido, che costituisce la maggior parte del peso del chicco, si accumula molto (come nel 2024, in assenza di stress), la proteina, presente in quantità più o meno costante, viene diluita in una massa maggiore e la sua percentuale si abbassa; quando invece lo stress da caldo limita l'accumulo di amido nella fase finale di riempimento (come nel giugno 2025), la stessa quantità di proteina si trova concentrata in un chicco più piccolo e la sua percentuale risulta relativamente più alta (Lama et al., 2023).

4.2.4 Volume di sedimentazione in SDS

Come descritto nel paragrafo 3.2.4, il *test* valuta indirettamente la forza del glutine presente nello sfarinato integrale, che influisce direttamente sulla qualità panificatoria della farina: in presenza di condizioni standard, un volume di sedimentazione più alto è indicativo di un glutine più forte e tenace.

L'analisi statistica su questo parametro è stata condotta sulle 17 varietà storiche comuni alle tre annate di studio (2023, 2024, 2025), mediante un'ANOVA a due vie (Tabella 4.3) con modello additivo Varietà + Annata: poiché è disponibile una sola osservazione per ciascuna combinazione varietà*annata, il modello è privo di replicazione e il termine di interazione varietà*annata non è stimabile separatamente dall'errore residuo. I risultati evidenziano differenze significative sia tra varietà ($F=4,61$; $p<0,001$) sia tra annate ($F=23,73$; $p<0,001$).

Tabella 4.3.

Analisi della varianza a due vie (Varietà + Annata) del volume di sedimentazione SDS nelle 17 varietà storiche.

Fonte di variazione	Somma quadrati	gdl	Media quadratica	F	p
Varietà	1697,48	16	106,09	4,61	<0,001***
Annata	1092,48	2	546,24	23,73	<0,001***
Residui	736,52	32	23,02	-	-

* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; n.s.: non significativo.

Per quanto riguarda le annate, i valori medi del volume di sedimentazione sono passati da 33,6 mL registrato nel 2023 a 38,4mL nel 2024 e 44,9 mL nel 2025 (Figura 4.4).

Tra le varietà, i valori medi più bassi si sono registrati in **Lo 3** (29,8 mL), **Lupo** (31,2 mL) e **Lama** (31,8 mL), i più alti **in Lo 228** (51,8 mL) e **Lo 1014** (49,2 mL): un quadro coerente con quanto osservato per il contenuto proteico NIR sullo sfarinato integrale, dove Lo 228 presenta anch'essa il valore medio più elevato (13,9%).

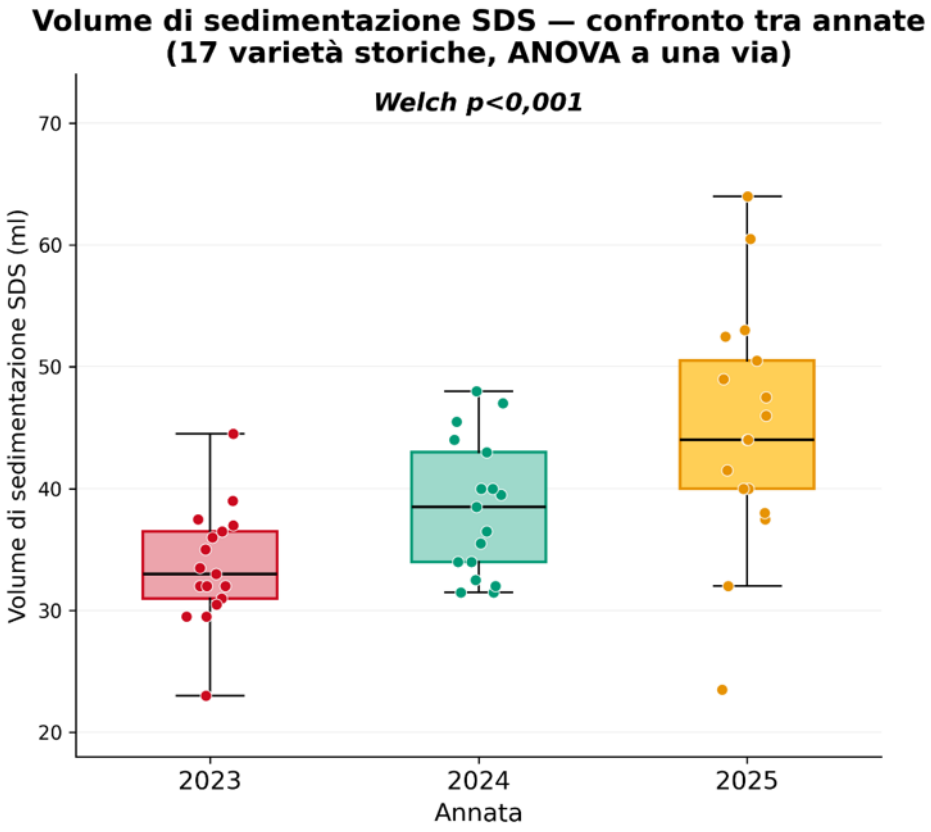

Figura 4.4 - Confronto del volume di sedimentazione SDS (mL) tra le tre annate di coltivazione (2023-2025), nelle 17 varietà storiche. L'annotazione statistica si basa su un'ANOVA a una via di Welch (F=9,98; gdl=2 e 30,2; p<0,001), applicata per varianze disomogenee (Levene, p=0,030) a fronte di normalità rispettata (Shapiro-Wilk, p=0,398); il *post-hoc* di Games-Howell indica come significativi i confronti 2023-2024 e 2023-2025, non il 2024-2025.

Le differenze nel volume di sedimentazione osservate tra il 2024 e il 2025 riflettono le corrispondenti variazioni del contenuto proteico, risultato più basso nel 2024. Questo comportamento è atteso, in accordo con quanto riportato in letteratura, relativamente alla relazione positiva tra contenuto proteico e volume di sedimentazione, parametro strettamente associato alla quantità e alla qualità delle proteine del glutine (Carter et al., 1999; Tian et al., 2021).

È interessante notare che nel 2023, a fronte di un elevato contenuto proteico, il volume di sedimentazione sia risultato inferiore rispetto alle altre annate. Ricordiamo che i materiali relativi all'annata 2023 erano stati prodotti in anni precedenti all'avvio della sperimentazione e risultavano stoccati da tempo in cella fredda. Questo risultato potrebbe essere quindi ascrivibile a una parziale degradazione o modificazione delle proteine durante il prolungato periodo di conservazione dei campioni, che potrebbe averne alterato le proprietà funzionali pur senza influenzarne in modo sostanziale il contenuto complessivo: un fenomeno coerente con quanto riportato in letteratura, dove la conservazione prolungata della granella è associata a una perdita delle proprietà viscoelastiche del glutine e a una riduzione dei valori di sedimentazione, del peso ettolitrico e del valore alveografico W, anche quando il contenuto proteico rimane sostanzialmente stabile (Strelec et al., 2024). Questo quadro è coerente anche con l'evidenza di progressive modificazioni biochimiche delle frazioni proteiche durante lo stoccaggio prolungato della granella, documentate in studi recenti (Hu et al., 2023), , e con quanto osservato in sperimentazioni non pubblicate condotte presso il CREA-CI di Vercelli su campioni sottoposti a stoccaggio prolungato, a conferma della necessità di approfondire specificamente l'effetto della conservazione a freddo sulla qualità tecnologica delle varietà storiche in studi futuri.

4.2.5 Falling Number

Per il *Falling Number* sia le varietà storiche sia i testimoni hanno il dato completo nelle annate 2023 e 2024; per problemi tecnico le varietà storiche del 2025 non sono state analizzate. Le medie delle varietà storiche comuni e dei testimoni sono riportate in appendice, come già indicato nell'introduzione del capitolo.

È stata eseguita un'ANOVA a due vie (Tabella 4.4), condotta sulle 17 varietà storiche, come già fatto per SDS e TKW. Per ciascuna combinazione varietà*annata è

disponibile una sola osservazione (nessuna replica tecnica): in questo modello a due vie si usa quindi un modello additivo (varietà + annata), senza il termine di interazione, e il test di Levene non è calcolabile.

Tabella 4.4.

Analisi della varianza a due vie (Varietà + Annata), condotta sulle 17 varietà storiche comuni alle annate 2023 e 2024.

Fonte di variazione	**Somma quadrati**	**gdl**	**Media quadratica**	**F**	**p**
Varietà	209363,2	16	13085,2	1,60	0,179 (n.s.)
Annata	360742,6	1	360742,6	44,11	< 0,001 ***
Residui	130852,0	16	8178,25	—	—

* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; n.s.: non significativo.

L'analisi della varianza ha evidenziato un effetto altamente significativo dell'annata sul *Falling Number*, mentre l'effetto della varietà non è risultato significativo. Questo indica che la variabilità osservata per questo parametro, come atteso, è attribuibile principalmente alle differenti condizioni ambientali dei due anni di prova piuttosto che alle caratteristiche genetiche delle varietà esaminate.

Nella Figura 4.5 è illustrata mediante *boxplot* la distribuzione del carattere *Falling Number* nelle due annate sperimentali, che consente di visualizzare la posizione centrale dei dati, la dispersione e gli eventuali *outlier*. Come si può osservare, il parametro ha mostrato un valore medio più elevato nel 2023 (430 s) rispetto al 2024 (224 s), accompagnato da una maggiore variabilità tra le varietà. Nell'annata 2024, ben 9 varietà su 17 hanno evidenziato valori inferiori al limite di 220 secondi. Tra queste, **Leone**, **Leonardo 44**, **Lo 1014**, **Lo 3**, **Leone 129**, **Lupetto**, **Leonardo**, **Leopardo** e **Lontra**, con valori compresi tra 152 e 217 secondi. I valori di *Falling Number* relativamente bassi osservati quell'anno sono coerenti con le condizioni climatiche registrate in quell'annata, quando si è registrata una notevole piovosità.

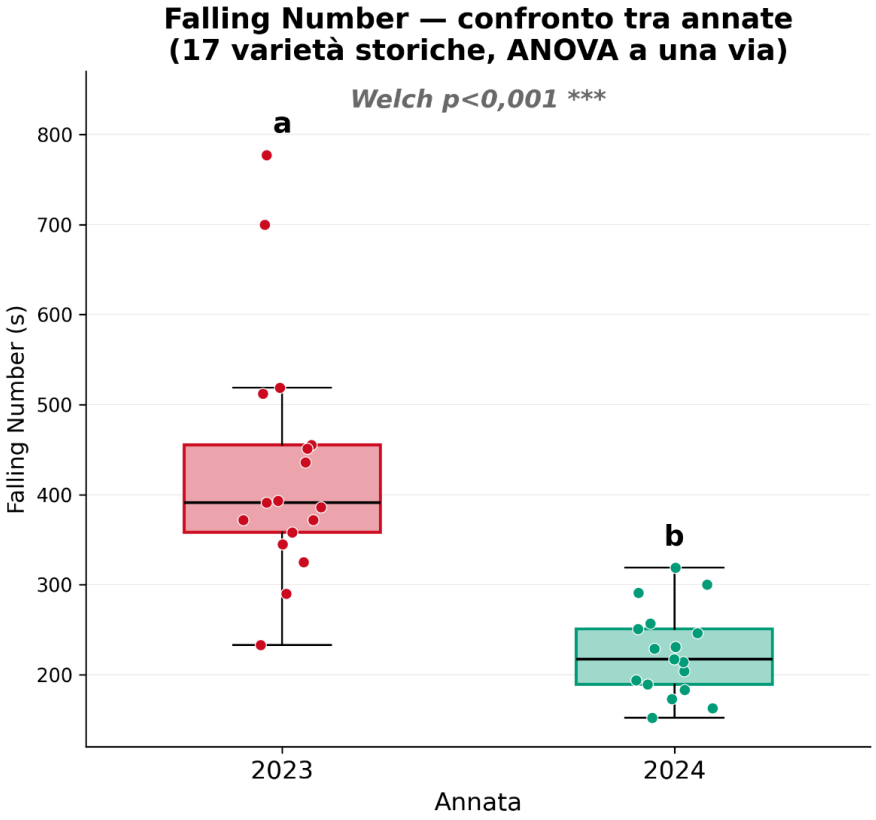

Figura 4.5 - *Falling Number (s)* nelle 17 varietà storiche, confronto tra le annate 2023 e 2024 (ANOVA a una via, test di Welch; lettere diverse sopra i *box* indicano differenza significativa, p<0,001).

4.3 Analisi tecnologiche complesse

4.3.1 Farinografo di Brabender

Le analisi farinografiche si sono svolte sui campioni di tutte e tre le annate (Tabelle 8.1,8.2 e 8.3).

Per ciascuna combinazione varietà*annata è disponibile una sola osservazione (nessuna replica tecnica): anche qui è stato condotto il modello a due vie additivo (varietà + annata), senza termine di interazione (Tabella 4.5).

Tabella 4.5.

Analisi della varianza a due vie (Varietà + Annata), sulle 17 varietà storiche (51 osservazioni per parametro).						
Parametro	**Fonte di variazione**	**Somma quadrati**	**gdl**	**Media quadratica**	**F**	**p**
Sviluppo (min)	**Varietà**	6,450	16	0,403	1,48	0,167 (ns)
	Annata	0,711	2	0,355	1,31	0,284 (ns)
	Residui	8,696	32	0,272	-	-
Stabilità (min)	**Varietà**	241,1	16	15,07	2,27	0,024*
	Annata	33,4	2	16,71	2,51	0,097 (ns)
	Residui	212.8	32	6.65	-	-
Rammollimento ICC 12' (UB)	**Varietà**	57242	16	3578	5,90	<0,001***
	Annata	5004	2	2502	4,13	0,025 *
	Residui	19397	32	606	-	-
Assorbimento d'acqua (%)	**Varietà**	126,3	16	7,894	8,57	<0,001***
	Annata	16,7	2	8,328	9,04	<0,001***
	Residui	29,5	32	0,922	-	-

* p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; n.s.: non significativo.

Dall'ANOVA a due vie emergono andamenti diversi a seconda del parametro considerato. Il **tempo di sviluppo** è risultato l'unico tra i quattro parametri farinografici a non essere influenzato significativamente né dall'annata né dalla varietà. I valori osservati sono infatti rimasti sostanzialmente stabili sia tra le tre annate di prova sia tra le diverse varietà storiche analizzate (Figura 4.6). Sebbene la varietà Liocorno abbia fatto registrare il tempo di sviluppo medio più basso (1,4 min) e Lo 65 quello più elevato (2,6 min), tali differenze non sono risultate statisticamente significative e pertanto devono essere considerate esclusivamente a livello descrittivo.

Per quanto riguarda la **stabilità**, si osserva invece un andamento differente. L'effetto della varietà è risultato significativo (p = 0,024), mentre quello dell'annata non ha raggiunto la soglia di significatività statistica (p = 0,097). Ciò suggerisce che le differenze osservate nella stabilità dell'impasto siano riconducibili principalmente alle caratteristiche genetiche dei genotipi esaminati, mentre le diverse condizioni ambientali verificatesi nelle annate di prova hanno esercitato un'influenza più limitata su questo parametro. In termini descrittivi, i valori medi di stabilità sono variati dal

minimo di 1,9 min registrato dalla varietà Lupo al massimo di 9,9 min osservato in Lo 228.

Il *boxplot* riportato in Figura 4.6 evidenzia una certa variabilità anche tra le annate, con valori medi pari a 3,97 ± 2,18 min nel 2023, 2,94 ± 1,07 min nel 2024 e 4,92 ± 4,74 min nel 2025. Tuttavia, né l'ANOVA a due vie né il successivo confronto a una via hanno evidenziato differenze statisticamente significative tra le annate. Pertanto, le differenze osservabili graficamente non trovano conferma sul piano statistico, probabilmente a causa dell'elevata variabilità all'interno di ciascuna annata, particolarmente accentuata nel 2025.

Il **grado di rammollimento** è risultato influenzato significativamente sia dall'annata sia dal genotipo. Il valore di tale parametro risulta significativamente più elevato nel 2024 (media pari a 127 UB) rispetto al 2025 (103 UB) (Figura 4.6). Tale risultato può essere collegato con il diverso andamento climatico tra le due annate, visto che la piovosità nel mese di maggio 2024 è stata nettamente maggiore (232,2 mm) rispetto a maggio 2025 (84,4 mm), condizione coerente con la maggiore pressione di septoria e fusariosi osservata nei bollettini agroclimatici CREA per quell'annata, nonostante il 2025 abbia beneficiato di un trattamento fungicida più tardivo e meglio posizionato, più vicino alla fase di spigatura-fioritura. È stato documentato che un'umidità prolungata durante le fasi di levata-spigatura favorisce lo sviluppo di patogeni fungini in grado di aumentare l'attività proteasica sul glutine, causando un indebolimento della rete glutinica e incrementando così il grado di rammollimento dell'impasto durante l'impastamento (Peršić et al., 2023).

Per quanto riguarda l'effetto varietale, il *test* di Tukey ha evidenziato la presenza di un gruppo di varietà caratterizzato da valori più elevati, comprendente in particolare **Lepre** (170 UB), **Lo 3** (168 UB), **Leone 129** (153 UB), **Libellula** (150 UB) e **Lupo** (149 UB), significativamente differente da un gruppo di varietà con valori più contenuti, rappresentato soprattutto da **Liocorno** (67 UB), **Lo 228** (68 UB), **Leonardo 44** (78 UB) e Lo 1014 (82 UB). Tali risultati indicano una marcata variabilità genetica per questo parametro, con alcune varietà caratterizzate da impasti meno stabili e maggiormente soggetti a rammollimento rispetto ad altre.

L'**assorbimento** idrico è risultato influenzato significativamente sia dall'annata che dalla varietà. Il parametro ha evidenziato un andamento crescente negli anni: 54,3%

nel 2023, 55,3% nel 2024, 55,7% nel 2025 (Figura 4.6). L'aumento osservato tra il 2024 e il 2025 è in linea con il corrispondente aumento del contenuto proteico, poiché l'assorbimento d'acqua cresce con la quantità di proteine della farina, nella misura di circa 1,2 punti percentuali per ogni punto percentuale di proteine (Sedláček & Švec, 2023). Per l'assorbimento il *post-hoc* individua invece un solo confronto significativo, proprio tra i due estremi: **Leopardo** (52,33±0,91%), il valore più basso, risulta significativamente inferiore a **Lo 228** (58,87±1,21%).

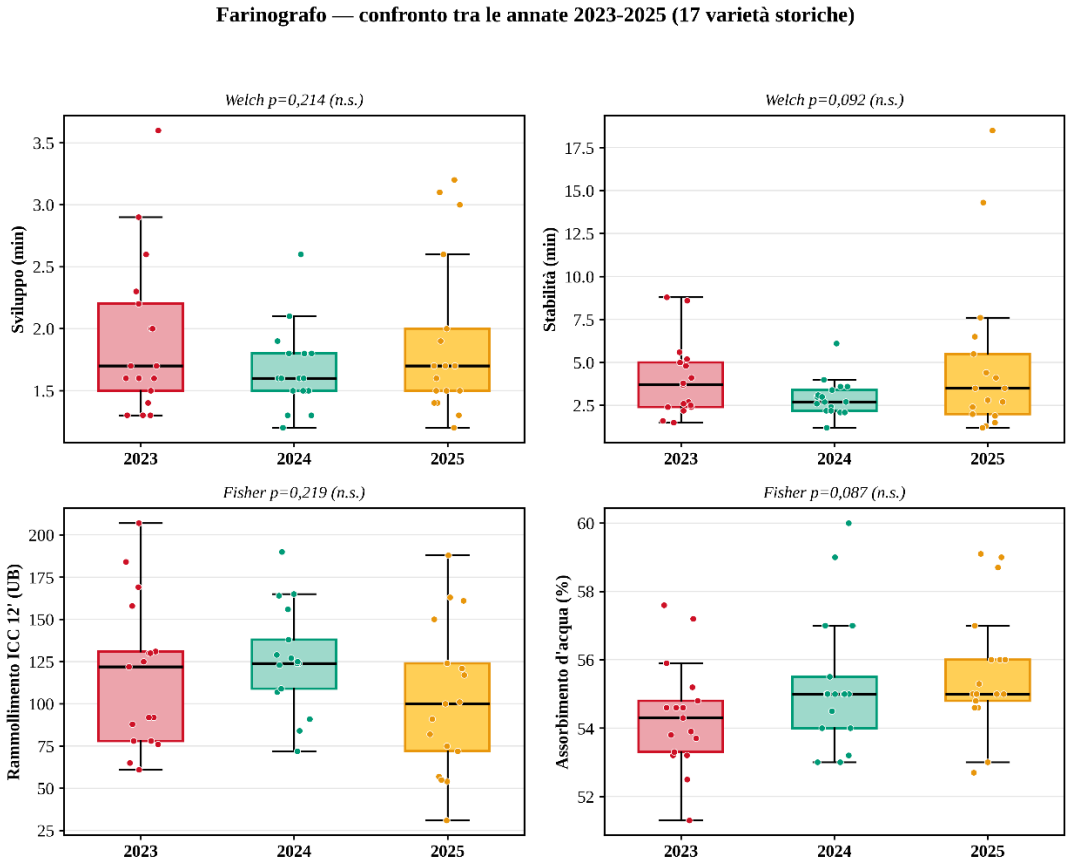

Figura 4.6 **–** Farinografo (sviluppo, stabilità, rammollimento ICC 12', assorbimento d'acqua) nelle 17 varietà storiche, confronto tra le annate 2023-2025. Nessun parametro mostra una differenza significativa tra le sole annate; per rammollimento e assorbimento l'annata diventa significativa solo nel modello a due vie, per effetto di blocco della varietà.

4.3.2 Alveografo di Chopin

Per questa prova reologica disponiamo delle annate 2023 e 2025: il 2024 è stato impossibile da analizzare per mancanza di materiale. Inoltre, come per l'analisi farinografica, non sono disponibili repliche tecniche, che richiederebbero quantità di farina elevate,

L'ANOVA sui dati alveografici è riportata nella Tabella 4.6.

Tabella 4.6.

Analisi della varianza a due vie (Varietà + Annata), sulle 17 varietà storiche (34 osservazioni per parametro, confronto 2023-2025).

Parametro	Fonte di variazione	Somma quadrati	gdl	Media quadratica	F	p
P-Tenacità (mm)	**Varietà**	4400,88	16	275,06	3,28	0,011*
	Annata	1680,03	1	1680,03	20,04	<0,001***
	Residui	1341,47	16	83,84	-	-
L-Estensibilità (mm)	**Varietà**	12773,53	16	798,35	2,25	0,058 (n.s.)
	Annata	2594,38	1	2594,38	7,31	0,016*
	Residui	5678,12	16	354,88	-	-
P/L	**Varietà**	1,05	16	0,07	1,92	0,101 (n.s.)
	Annata	0,66	1	0,66	19,34	<0,001***
	Residui	0,55	16	0,03	-	-
W ($\times 10^{-4}$ J)	**Varietà**	40098,53	16	2506,16	3,21	0,013*
	Annata	6088,97	1	6088,97	7,79	0,013*
	Residui	12504,53	16	781,53	-	-

** p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; n.s.: non significativo.*

Dall'ANOVA a due vie emerge un quadro pressoché opposto a quello del farinografo: qui è l'annata a dominare, risultando significativa per tre dei quattro parametri, mentre la varietà ha un peso più debole e disomogeneo. Il confronto tra le due annate per tutti e quattro i parametri è illustrato in Figura 4.7.

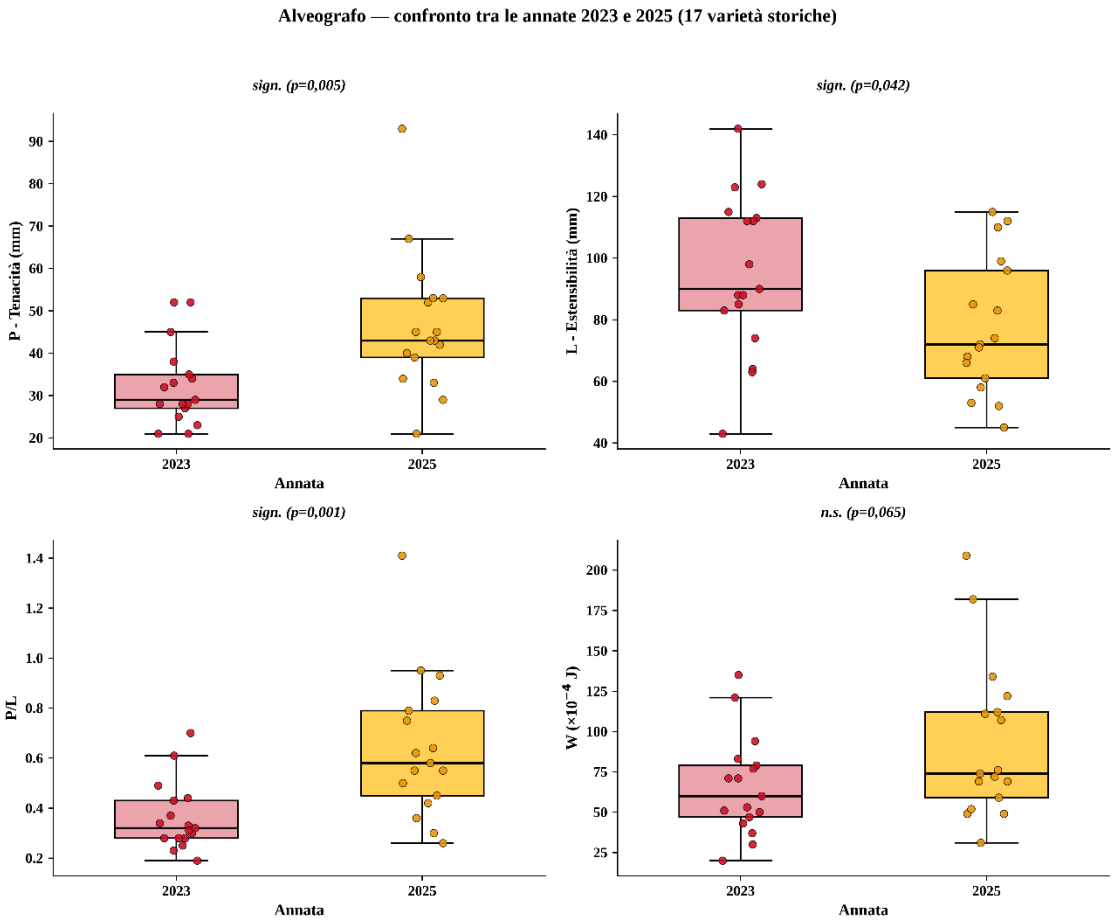

Figura 4.7 - Alveografo (P, L, P/L, W) nelle 17 varietà storiche, confronto tra le annate 2023 e 2025. Significativo per P, L e P/L; non significativo solo per W (p=0,065).

Per quanto riguarda la **tenacità** (parametro **P**), sia la varietà (p = 0,011) sia l'annata (p < 0,001) hanno mostrato un effetto significativo. In particolare, il valore medio di P è aumentato sensibilmente nel corso delle due annate, passando da 32 mm nel 2023 a 47 mm nel 2025; tale differenza è stata confermata anche dal confronto a una via (p = 0,005) (Figura 4.8). Considerando i valori medi varietali, la tenacità è variata da un minimo di 23 mm registrato nella varietà **Lupo** a un massimo di 69 mm osservato in **Lo 228**, evidenziando una marcata variabilità genetica per questo parametro.

Per il parametro **L** (estensibilità), il quadro si presenta in parte opposto. L'effetto dell'annata è risultato significativo (p = 0,016), mentre quello della varietà si è collocato in prossimità della soglia di significatività statistica (p = 0,058). Tra le due annate si è osservata una diminuzione dell'estensibilità, con valori medi passati da 95 mm nel 2023 a 78 mm nel 2025; anche in questo caso il confronto a una via ha confermato la differenza tra le annate (p = 0,042). A livello descrittivo, il valore medio

più basso è stato rilevato nella varietà **Lepre** (54 mm), mentre il più elevato in **Leonardo** (121 mm).

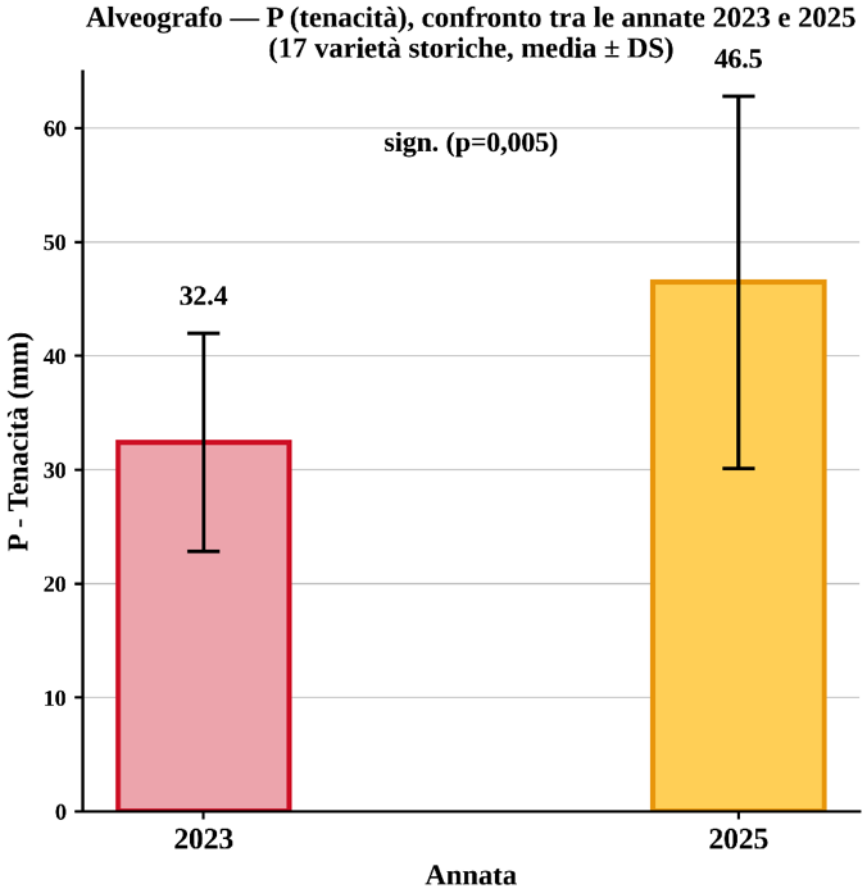

Figura 4.8 - Alveografo, P (tenacità) nelle 17 varietà storiche, confronto tra le annate 2023 e 2025 (media ± DS). Significativo (p=0,005).

Sebbene i parametri P e L siano importanti per caratterizzare una farina, il loro rapporto (**P/L**) è generalmente considerato più informativo dal punto di vista tecnologico, in quanto esprime l'equilibrio tra le proprietà di tenacità ed estensibilità. Valori troppo elevati o troppo bassi indicano infatti impasti sbilanciati, mentre valori intermedi sono generalmente associati a migliori caratteristiche di lavorazione.

L'analisi statistica ha evidenziato un effetto significativo dell'annata. Nelle varietà storiche analizzate il P/L medio passa, infatti, da 0,36 nel 2023 a 0,64 nel 2025, uno spostamento guidato dall'aumento di P più che da una riduzione di L.

L'effetto varietale non è risultato invece significativo. Tra le varietà, il valore più basso si registra in **Leopardo** (0,23) e il più alto in **Lo 228** (0,89). Questo spostamento verso impasti proporzionalmente più tenaci che estensibili tra le due annate è coerente

con quanto riportato in letteratura, secondo cui il rapporto P/L è controllato principalmente dalle condizioni ambientali e dall'annata di coltivazione più che dal genotipo in prove condotte su più stagioni (Kaya & Sahin, 2015).

Per quanto riguarda la **forza dell'impasto** (W), infine, l'analisi statistica con il modello a due vie ha evidenziato un'influenza significativa sia dell'annata (p=0,013) sia della varietà (p=0,013), mentre il confronto diretto a una via tra le sole annate non conferma questa differenza (p=0,065). Per le annate, il valore medio del 2023 è risultato di 66 × 10^{-4} J, quello del 2025 di 93 × 10^{-4} J. Tra le varietà, invece, il valore medio più basso si registra in **Lupo** (37 ×10^{-4} J) e il più alto in **Lo 228** (165 × 10^{-4} J). Va sottolineato che W e P/L, pur descrivendo entrambi la forza e l'equilibrio tenacità-estensibilità dell'impasto, misurano aspetti distinti e vanno sempre considerati insieme nell'interpretazione reologica (Jødal & Larsen, 2021).

4.4 Resa della macinazione

La resa di macinazione (%) esprime la quota di farina ottenuta rispetto alla granella macinata, un parametro di interesse molitorio oltre che tecnologico. Il dato è disponibile solo per le annate 2024 e 2025. L'analisi statistica è stata condotta sulle 17 varietà storiche comuni alle due annate, escludendo le 5 varietà testimoni.

Anche per questo parametro non è stato possibile effettuare repliche tecniche, per cui, per ciascuna combinazione varietà*annata è disponibile una sola osservazione; il modello a due vie è additivo (varietà + annata), senza termine di interazione. I risultati del modello a due vie sono riassunti in Tabella 4.7.

Tabella 4.7.

Analisi della varianza a due vie (Varietà + Annata), sulle 17 varietà storiche (34 osservazioni, confronto 2024-2025).

Parametro	**Fonte di variazione**	**Somma quadrati**	**gdl**	**Media quadratica**	**F**	p
Resa	**Varietà**	186,84	16	11,68	2,50	0,038*
	Annata	75,52	1	75,52	16,20	<0,001***
	Residui	74,60	16	-	-	—

** p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; n.s.: non significativo.*

Dall'ANOVA a due vie risultano significativi entrambi i fattori: la varietà in modo debole, l'annata in modo più marcato. Il confronto diretto tra le sole annate conferma

la differenza, confermata anche dal test non parametrico di controllo, necessario perché la normalità dei residui del modello a due vie non è pienamente rispettata. La resa media scende dal 2024 (52,8±2,2%) al 2025 (49,9±3,4%), un calo di circa 3 punti percentuali. Tra le varietà, il valore medio biennale più basso si registra in Leone (47,0%, penalizzata soprattutto dal dato 2025) e il più alto in Lupetto (54,5%).

Il calo della resa tra le due annate è illustrato in Figura 4.9 e può essere messo in relazione con il diverso andamento climatico di fine ciclo: giugno 2025, fase di maturazione e raccolta per quell'annata (raccolta 25/06/2025), è risultato più caldo e più secco di giugno 2024 (71,8 mm e 25,2°C contro 118,6 mm e 23,0°C). Condizioni di calore e scarsità idrica durante il riempimento della cariosside sono note in letteratura per ridurre il peso e la qualità della granella (Balla et al., 2011), un effetto che può riflettersi anche su una minore resa in farina alla macinazione. Va però sottolineato che nello stesso periodo la concimazione azotata è aumentata da 163 a 204 U N/ha (+25% tra il 2024 e il 2025), un fattore agronomico che agisce in parallelo e che l'analisi statistica non consente di scomporre dalla componente climatica: l'interpretazione proposta resta quindi plausibile ma non esclusiva, coerentemente con la natura multifattoriale delle differenze osservate tra le annate.

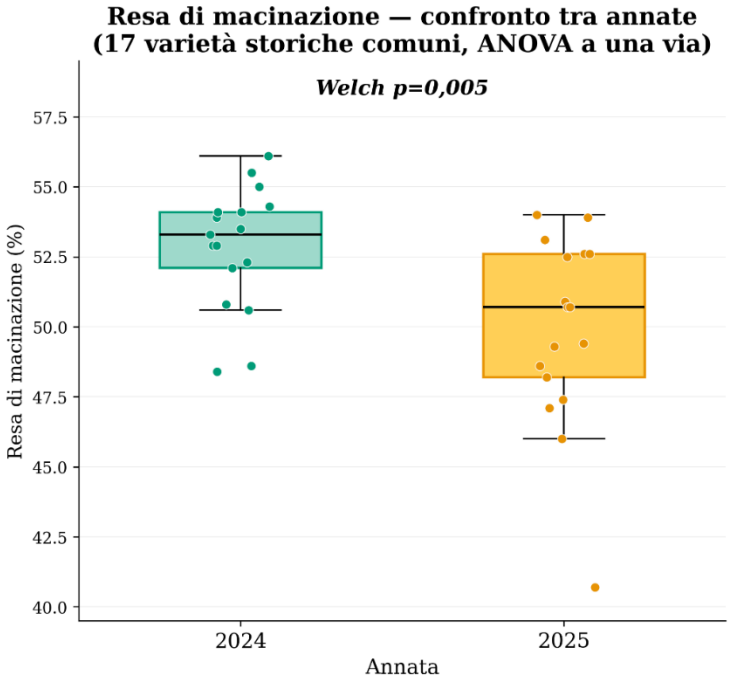

Figura 4.9 - Resa di macinazione (%) nelle 17 varietà storiche, confronto tra le annate 2024 e 2025. Significativo (p=0,005).

Un aspetto apparentemente in contraddizione con il calo di resa è l'andamento del peso di mille semi, che nello stesso periodo aumenta da 42,6 g nel 2024 a 45,6 g nel 2025: un seme più pesante produce, in genere, una quantità di farina maggiore. In modo analogo, nel grano tenero l'aggiunta di parametri caratterizzazione della singola cariosside, quali durezza e dimensione, misurati con il *Single Kernel Characterization System*, al peso ettolitrico spiega una quota molto più ampia della variabilità della resa in farina rispetto al solo peso (Lyford et al., 2005). Un aumento del peso medio della cariosside non garantisce quindi, di per sé, un aumento della resa, se non è accompagnato da una distribuzione dimensionale e da una durezza favorevoli. Va comunque sottolineato che questa lettura resta un'associazione tratta dalla letteratura e non una relazione causale verificata direttamente sui dati di questa tesi, poiché distribuzione dimensionale e durezza della cariosside non sono state misurate.

Questa lettura, pur coerente con l'andamento dei dati climatici disponibili per le due annate, resta un'interpretazione basata sull'associazione tra andamento climatico e resa di macinazione: non essendo stati misurati direttamente il contenuto di amido nelle due annate, il meccanismo proposto non può essere verificato causalmente con i dati raccolti in questo lavoro.

4.5 Classificazione delle varietà storiche secondo l'Indice Sintetico di Qualità (ISQ)

La classificazione delle varietà storiche secondo l'Indice Sintetico di Qualità (ISQ) è stata effettuata confrontando le prestazioni medie delle singole varietà con quelle dei testimoni appartenenti alle diverse classi qualitative di riferimento, valutati nelle medesime annate di prova. Per tale confronto sono stati utilizzati i parametri tradizionalmente impiegati nella classificazione qualitativa del frumento tenero, ovvero il contenuto proteico della farina, i parametri alveografici W e P/L e la stabilità farinografica (Tabella 4.8), secondo lo schema ISQ proposto dall'ASSINCER e descritto in letteratura (Foca et al., 2007).

Va tuttavia evidenziato che i testimoni delle diverse classi qualitative hanno mostrato, nel triennio di prova, prestazioni complessivamente inferiori a quelle attese sulla base della loro classificazione commerciale. Ad esempio, i testimoni appartenenti

alla classe dei frumenti di forza hanno presentato un valore medio di W pari a 163 × 10^{-4} J, nettamente inferiore ai livelli generalmente associati a tale categoria. Di conseguenza, la classificazione delle varietà storiche ottenuta mediante l'ISQ deve essere interpretata come un confronto relativo rispetto ai testimoni valutati nelle medesime condizioni sperimentali, piuttosto che come un'attribuzione assoluta alle classi qualitative di riferimento.

Sulla base dei valori medi di tali parametri, nessuna delle 17 varietà storiche raggiunge i requisiti previsti per la classe dei frumenti di forza (FF). Dal confronto con il testimone FPS Algeri, la varietà **Lo 228** può essere classificata come panificabile superiore: ha mostrato un contenuto proteico molto elevato (12,9%), un rapporto P/L equilibrato (0,89), una forza alveografica (W) pari a 165 × 10^{-4} J e una stabilità farinografica di 9,9 min. Tutti i valori sono risultati infatti superiori a quelli registrati dal testimone, evidenziando un buon livello di attitudine panificatoria.

Quattro varietà, **Leonardo 44**, **Liocorno**, **Lo 1014** e **Lontra**, sulla base dei risultati delle analisi effettuate, rientrano nella classe dei frumenti panificabili (FP). Di queste, **Lo 1014** e **Liocorno** hanno evidenziato prestazioni superiori rispetto al testimone Solehio, presentando un contenuto proteico più elevato (rispettivamente 11,3% e 11,5%, contro il 9,9% del testimone) e una maggiore forza alveografica (W pari rispettivamente a 123 e 116 × 10^{-4} J, rispetto a 113 × 10^{-4} J). Per quanto riguarda il rapporto P/L e la stabilità farinografica, i valori osservati sono risultati sostanzialmente in linea con quelli del testimone.

Le rimanenti dodici varietà possono essere classificate come frumenti biscottieri (FB). Di queste, **Leonardo** e **Lucciola** hanno evidenziato prestazioni qualitative superiori rispetto a quelle del testimone Modern. In particolare, il contenuto proteico è risultato pari all'11,4% per **Leonardo** e all'11,1% per **Lucciola**, rispetto al 9,6% del testimone; analogamente, la forza alveografica è stata pari a 95 × 10^{-4} J per **Leonardo** e a 96 × 10^{-4} J per **Lucciola**, contro i 71 × 10^{-4} J del testimone. La stabilità farinografica è invece risultata sostanzialmente analoga a quella del testimone. Le altre dieci varietà, pur presentando un contenuto proteico superiore a quello del testimone FB, hanno evidenziato una forza alveografica inferiore e una stabilità variabile da 1,9 min (**Lupo**)

a 4,9 min (**Leopardo**). In particolare, **Lupo**, **Lepre** e **Lama** hanno mostrato impasti particolarmente deboli e poco tolleranti alla lavorazione, risultando difficili da manipolare durante le prove reologiche.

In conclusione, i risultati della caratterizzazione tecnologica hanno confermato che le varietà storiche presentano generalmente un contenuto proteico superiore rispetto alle moderne varietà di riferimento. Tale evidenza contrasta con la diffusa convinzione secondo cui i cosiddetti "grani antichi" sarebbero caratterizzati da bassi livelli di glutine. I risultati ottenuti suggeriscono piuttosto che la principale differenza risieda nelle caratteristiche qualitative del glutine: pur in presenza di contenuti proteici elevati, molte varietà storiche mostrano infatti una minore forza glutinica e una più limitata attitudine alla panificazione rispetto alle varietà moderne selezionate per l'industria molitoria e panificatoria (Ormoli et al., 2015).

Tabella 4.8.

Classificazione ISQ: valori medi delle varietà storiche e dei testimoni					
Varietà	Medie				Classificazione ISQ
	Proteine farina (%)	P/L	W ($\times 10^{-4}$ J)	Stabilità (min)	
Lama	10,9	0,42	40	2,2	FB
Leonardo	11,4	0,34	95	3,9	FB
Leonardo 44	11,7	0,36	106	4,5	FP
Leone	12,0	0,29	62	2,9	FB
Leone 129	11,2	0,55	47	2,9	FB
Leopardo	11,9	0,23	64	4,9	FB
Lepre	10,6	0,69	43	2,4	FB
Libellula	11,1	0,57	68	2,0	FB
Liocorno	11,5	0,57	116	8,1	FP
Lo 1014	11,3	0,78	123	6,1	FP
Lo 228	12,9	0,89	165	9,9	FPS
Lo 3	11,7	0,54	51	2,0	FB
Lo 65	11,2	0,41	62	2,8	FB
Lontra	11,0	0,67	103	4,2	FP
Lucciola	11,1	0,49	96	3,3	FB
Lupetto	10,6	0,42	70	3,2	FB
Lupo	11,6	0,32	37	1,9	FB
Testimoni FF (Bologna, Rebelde)	12,7	0,50	163	15,3	FF
Testimone FPS (Algeri)	11,6	0,46	130	8,5	FPS
Testimone FP (Solehio)	9,9	0,61	113	7,9	FP
Testimone FB (Modern)	9,6	0,61	71	3,9	FB

Nota. Proteine NIR della farina raffinata e stabilità farinografica: media delle annate 2023, 2024 e 2025. P/L e W alveografici: per le varietà storiche media delle annate 2023 e 2025, poiché nel 2024 l'analisi alveografica delle varietà storiche non è disponibile; per i testimoni media delle annate 2023, 2024 e 2025. Testimoni accorpati per classe: FF = Bologna e Rebelde; FPS = Algeri; FP = Solehio; FB = Modern.

6 CONCLUSIONI

La caratterizzazione tecnologica delle 17 varietà storiche di frumento tenero (*Triticum aestivum* L.), comuni alle annate analizzate e costituite dall'Istituto Strampelli di Lonigo, ha riguardato quattordici parametri, sei semplici (durezza, peso di mille semi, SDS, *Falling Number*, contenuto proteico NIR, resa di macinazione) e otto complessi, suddivisi nei quattro parametri farinografici (tempo di sviluppo, stabilità, grado di rammollimento e assorbimento d'acqua) e nei quattro parametri alveografici (P, L, P/L e W)..

L'analisi ha evidenziato un'elevata variabilità tra i materiali esaminati e ha permesso di individuarne le potenziali destinazioni d'uso. I risultati hanno confermato che le varietà storiche presentano frequentemente contenuti proteici elevati, spesso superiori a quelli dei testimoni moderni, smentendo la diffusa convinzione che i cosiddetti "grani antichi" siano necessariamente caratterizzati da un ridotto contenuto di glutine. Tuttavia, a fronte di livelli proteici generalmente elevati, molte varietà hanno mostrato valori di forza alveografica e di stabilità dell'impasto inferiori rispetto a quelli richiesti dalle moderne filiere della panificazione, indicando un glutine debole, di qualità differente rispetto a quella delle varietà selezionate negli ultimi decenni. D'altronde, la richiesta di glutine forte è emersa solo con l'introduzione della panificazione industriale, che richiede impasti dotati di elevata forza e stabilità per sopportare le lavorazioni meccaniche, i processi automatizzati e i tempi di lievitazione controllati.

Nessuna delle varietà esaminate ha raggiunto i requisiti della classe dei frumenti di forza, mentre una sola varietà (Lo 228) è risultata assimilabile ai frumenti panificabili superiori. Quattro varietà sono state classificate come frumenti panificabili e le restanti come frumenti biscottieri. Tali risultati suggeriscono che le varietà storiche rappresentino una risorsa genetica di interesse non tanto per l'elevata forza panificatoria, quanto per la diversificazione qualitativa delle produzioni, la valorizzazione di prodotti tradizionali e il miglioramento genetico, grazie alla presenza di caratteristiche tecnologiche peculiari e di un'ampia variabilità genetica.

Un'origine climatica o agronomica di questa variabilità interannuale è stata verificabile solo per il confronto 2024 e 2025, dato che il campione 2023 proviene da seme conservato in cella frigorifera e non corrisponde a una semina e raccolta di campo di quell'annata; dove il confronto era possibile, la resa di macinazione è risultata associabile a un giugno 2025 più caldo e più secco rispetto al 2024, pur in presenza di un fattore agronomico concorrente, l'aumento della concimazione azotata, che l'analisi statistica non consente di scomporre dalla componente climatica. Futuri lavori potrebbero approfondire questi aspetti attraverso disegni sperimentali dedicati, capaci di scorporare più nettamente la componente agronomica da quella climatica, ad esempio mediante prove pluriennali condotte su seme di produzione annuale anziché conservato, o attraverso schemi fattoriali che facciano variare la concimazione azotata a parità di condizioni climatiche. Sarebbe inoltre utile estendere la caratterizzazione tecnologica ad annate successive, per consolidare la robustezza statistica dei confronti interannuali, e approfondire nello specifico l'effetto della conservazione a freddo prolungata sulla qualità tecnologica della granella, aspetto emerso dal confronto tra le annate e meritevole di indagine dedicata. Dal punto di vista applicativo, i risultati ottenuti suggeriscono che il valore di queste varietà storiche non risieda tanto in una loro possibile integrazione nella grande filiera industriale, quanto nella possibilità di sviluppare linee di prodotto pregiate e differenziate, destinate a filiere corte e di nicchia, capaci di valorizzarne le caratteristiche tecnologiche peculiari

7 BIBLIOGRAFIA

Ahmed, H. I., Heuberger, M., Schoen, A., Koo, D.-H., Quiroz-Chavez, J., Adhikari, L., Raupp, J., Cauet, S., Rodde, N., Cravero, C., Callot, C., Lazo, G. R., Kathiresan, N., Sharma, P. K., Moot, I., Yadav, I. S., Singh, L., Saripalli, G., Rawat, N., … Krattinger, S. G. (2023). Einkorn genomics sheds light on history of the oldest domesticated wheat. *Nature*, *620*(7975), 830–838. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06389-7

Anderson, O. D., & Greene, F. C. (1997). The α-gliadin gene family.II. DNA and protein sequence variation, subfamily structure, and origins of pseudogenes: II. DNA and protein sequence variation, subfamily structure, and origins of pseudogenes. *Theoretical and Applied Genetics*, *95*(1–2), 59–65. https://doi.org/10.1007/s001220050532

Angelini, R. (A c. Di). (2007). *Il grano*. Bayer CropScience / ART Servizi Editoriali.

Arzani, A., & Ashraf, M. (2017). Cultivated ancient heats (Triticum spp.): A potential source of health-beneficial food products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *16*(3), 477–488. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12262

Awika, J. M. (2011). Major cereal grains production and use around the world. In J. M. Awika, V. Piironen, & S. Bean (A c. Di), *ACS Symposium Series* (Vol. 1089, pp. 1–13). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/bk-2011-1089.ch001

BAKERpedia. (s.d.). *Falling Number test* [Https://bakerpedia.com/processes/falling-number-test/]. BAKERpedia.

Balla, K., Rakszegi, M., Li, Z., Békés, F., Bencze, S., & Veisz, O. (2011). Quality of winter wheat in relation to heat and drought shock after anthesis. *Czech Journal of Food Sciences*, *29*(2), 117–128. https://doi.org/10.17221/227/2010-CJFS

Barron, C., Surget, A., & Rouau, X. (2007). Relative amounts of tissues in mature wheat (Triticum aestivum L.) grain and their carbohydrate and phenolic acid composition. *Journal of Cereal Science*, *45*(1), 88–96. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.07.004

Bechtel, D. B., & Wilson, J. D. (2003). Amyloplast formation and starch granule development in hard red winter wheat. *Cereal Chemistry*, *80*(2), 175–183. https://doi.org/10.1094/CCHEM.2003.80.2.175

Bergman, C. J., Gualberto, D. G., Campbell, K. G., Sorrells, M. E., & Finney, P. L. (1998). Genotype and environment effects on wheat quality traits in a population derived from a soft by hard cross. *Cereal Chemistry*, *75*(5), 729–737. https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.5.729

Berni, R., Cantini, C., Romi, M., Hausman, J.-F., Guerriero, G., & Cai, G. (2018). Agrobiotechnology goes wild: Ancient local varieties as sources of bioactives. *International Journal of Molecular Sciences*, *19*(8), 2248. https://doi.org/10.3390/ijms19082248

Borasio, E. (1997). Classificazione merceologica del frumento con indici di qualità. *Agricoltura*, *9*, 59–61.

Branlard, G., & Dardevet, M. (1985). Diversity of grain proteins and bread wheat quality. *Journal of Cereal Science*, *3*(4), 329–343. https://doi.org/10.1016/S0733-5210(85)80006-0

Braun, H. J., & Săulescu, N. N. (2002). Breeding winter and facultative wheat. In B. C. Curtis, S. Rajaram, & H. Gómez Macpherson (A c. Di), *Bread Wheat: Improvement and Production* (FAO).

Brouns, F., Hemery, Y., Price, R., & Anson, N. M. (2012). Wheat aleurone: Separation, composition, health aspects, and potential food use. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *52*(6), 553–568. https://doi.org/10.1080/10408398.2011.589540

Campbell, G. M. (2007). Chapter 7 roller milling of wheat. In *Handbook of Powder Technology* (Vol. 12, pp. 383–419). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12010-8

Cappelli, A., Oliva, N., & Cini, E. (2020). Stone milling versus roller milling: A systematic review of the effects on wheat flour quality, dough rheology, and bread characteristics. *Trends in Food Science & Technology*, *97*, 147–155. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.008

Carter, B. P., Morris, C. F., & Anderson, J. A. (1999). Optimizing the SDS sedimentation test for end-use quality selection in a soft white and club wheat breeding program. *Cereal Chemistry*, *76*(6), 907–911. https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.6.907

Cavalet-Giorsa, E., González-Muñoz, A., Athiyannan, N., Holden, S., Salhi, A., Gardener, C., Quiroz-Chávez, J., Rustamova, S. M., Elkot, A. F., Patpour, M., Rasheed, A., Mao, L., Lagudah, E. S., Periyannan, S. K., Sharon, A., Himmelbach, A., Reif, J. C., Knauft, M., Mascher, M., … Krattinger, S. G. (2024). Origin and evolution of the bread wheat D genome. *Nature*, *633*(8031), 848–855. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07808-z

Chen, R. Y., Seabourn, B. W., Xie, F., & Herald, T. J. (2009). A modified extensigraph method for evaluating dough properties of hard wheat breeding lines. *Cereal Chemistry*, *86*(5), 582–589. https://doi.org/10.1094/CCHEM-86-5-0582

Dal Belin Peruffo, A., Pogna, N. E., Tealdo, E., Tutta, C., & Albuzio, A. (1985). Isolation and partial characterisation of γ-Gliadins 40 and 43·5 associated with quality in common wheat. *Journal of Cereal Science*, *3*(4), 355–362. https://doi.org/10.1016/S0733-5210(85)80008-4

De Santis, M. A., Soccio, M., Laus, M. N., & Flagella, Z. (2021). Influence of drought and salt stress on durum wheat grain quality and composition: A review. *Plants*, *10*(12), 2599. https://doi.org/10.3390/plants10122599

D'Egidio, M. G., & Carcea, M. (2013). I metodi analitici per la misura della qualità dei cereali. *Molini d'Italia, 0026-9018*, *6*, 16–21.

Delcour, J. A., & Hoseney, R. C. (2010). *Principles of cereal science and technology* (Third Edition). AACC International, Inc. https://doi.org/10.1094/9781891127632

Dinu, M., Whittaker, A., Pagliai, G., Benedettelli, S., & Sofi, F. (2018). Ancient wheat species and human health: Biochemical and clinical implications. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, *52*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2017.09.001

Dobraszczyk, B. J., & Morgenstern, M. P. (2003). Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*, *38*(3), 229–245. https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00059-6

D'Ovidio, R., & Masci, S. (2004). The low-molecular-weight glutenin subunits of wheat gluten. *Journal of Cereal Science*, *39*(3), 321–339. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.002

Dreiseitl, A., & Nesvadba, Z. (2026). Non authentic genotypes an unrevealed problem in plant research and breeding. *Plants*, *15*(5), 788. https://doi.org/10.3390/plants15050788

Dunn, O. J. (1964). Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, *6*(3), 241–252. https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181

Dupont, F. M., & Altenbach, S. B. (2003). Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *Journal of Cereal Science*, *38*(2), 133–146. https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00030-4

Elbasyoni, I. S., Morsy, S. M., Ramamurthy, R. K., & Nassar, A. M. (2018). Identification of genomic regions contributing to protein accumulation in wheat under well-watered and water deficit growth conditions. *Plants*, *7*(3), 56. https://doi.org/10.3390/plants7030056

Evers, A. D. (1973). The size distribution among starch granules in wheat endosperm. *Starch - Stärke*, *25*(9), 303–304. https://doi.org/10.1002/star.19730250905

FAO/WHO. (1998). *Carbohydrates in human nutrition. Report of a joint FAO/WHO expert consultation* (No. 66; FAO Food and Nutrition Paper, pp. 1–140). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/w8079e/w8079e00.htm

Ferreira, D. M., Coscueta, E. R., Brassesco, M. E., & Pintado, M. (2026). Processing and valorization of wheat bran, germ and their fractions: An evidence-graded

review of composition, technologies and applications. *Foods*, *15*(8), 1455. https://doi.org/10.3390/foods15081455

Feuillet, C., Langridge, P., & Waugh, R. (2008). Cereal breeding takes a walk on the wild side. *Trends in Genetics*, *24*(1), 24–32. https://doi.org/10.1016/j.tig.2007.11.001

Ficco, D. B. M., Mastrangelo, A. M., Trono, D., Borrelli, G. M., De Vita, P., Fares, C., Beleggia, R., Platani, C., & Papa, R. (2014). The colours of durum wheat: A review. *Crop & Pasture Science*, *65*(1), 1–15. https://doi.org/10.1071/CP13293

Fišteš, A. (2021). The evolution of milling process. In F. Boukid (A c. Di), *Cereal-Based Foodstuffs: The Backbone of Mediterranean Cuisine* (pp. 19–45). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69228-5_2

Foca, G., Ulrici, A., Corbellini, M., Pagani, M. A., Lucisano, M., Franchini, G. C., & Tassi, L. (2007). Reproducibility of the Italian ISQ method for quality classification of bread wheats: An evaluation by expert assessors. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *87*(5), 839–846. https://doi.org/10.1002/jsfa.2785

Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R companion to applied regression* (Third edition). SAGE.

Gautier, M.-F., Cosson, P., Guirao, A., Alary, R., & Joudrier, P. (2000). Puroindoline genes are highly conserved in diploid ancestor wheats and related species but absent in tetraploid Triticum species. *Plant Science*, *153*(1), 81–91. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00258-7

Gegas, V. C., Nazari, A., Griffiths, S., Simmonds, J., Fish, L., Orford, S., Sayers, L., Doonan, J. H., & Snape, J. W. (2010). A genetic framework for grain size and

shape variation in wheat. *The Plant Cell*, *22*(4), 1046–1056. https://doi.org/10.1105/tpc.110.074153

Gras, P. W., & O'Brien., L. (1992). Application of a 2-gram mixograph to early generation selection for dough strength. *Cereal Chemistry*, *69*(3), 254–257.

Gupta, R. B., & MacRitchie, F. (1994). Allelic variation at glutenin subunit and gliadin loci, Glu-1, Glu-3 and Gli-1 of gommon wheats. II. biochemical basis of the allelic effects on dough properties. *Journal of Cereal Science*, *19*(1), 19–29. https://doi.org/10.1006/jcrs.1994.1004

Gustafson, P., Raskina, Olga, Ma, XueFeng, & Nevo, Eviatar. (2009). Wheat evolution, domestication, and improvement. In Carver, Brett F. (A c. Di), *Wheat: Science and trade* (Wiley, pp. 5–30).

Haard, N. F., Odunfa, S. A., Lee, C.-H., Quintero-Ramírez, R., Lorence-Quiñones, A., & Wacher-Radarte, C. (1999). FAO Agricultural Services Bulletin No. 138. https://www.fao.org/4/x2184e/x2184e00.htm

Haas, M., Schreiber, M., & Mascher, M. (2019). Domestication and crop evolution of wheat and barley: Genes, genomics, and future directions. *Journal of Integrative Plant Biology*, *61*(3), 204–225. https://doi.org/10.1111/jipb.12737

Harris, P. J., & Ferguson, L. R. (1993). Dietary fibre: Its composition and role in protection against colorectal cancer. *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, *290*(1), 97–110. https://doi.org/10.1016/0027-5107(93)90037-G

Harris, P. J., & Ferguson, L. R. (1999). Dietary fibres may protect or enhance carcinogenesis. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *443*(1–2), 95–110. https://doi.org/10.1016/S1383-5742(99)00013-7

Hatcher, D. W., Anderson, M. J., Desjardins, R. G., Edwards, N. M., & Dexter, J. E. (2002). Effects of flour particle size and starch damage on processing and quality of white salted noodles. *Cereal Chemistry*, *79*(1), 64–71. https://doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.1.64

Hu, H., Qiu, M., Qiu, Z., Li, S., Lan, L., & Liu, X. (2023). Variation in wheat quality and starch structure under granary conditions during long-term storage. *Foods*, *12*(9), 1886. https://doi.org/10.3390/foods12091886

Hussain, A., Larsson, H., Olsson, M. E., Kuktaite, R., Grausgruber, H., & Johansson, E. (2012). Is organically produced wheat a source of tocopherols and tocotrienols for health food? *Food Chemistry*, *132*(4), 1789–1795. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.141

Hyles, J., Bloomfield, M. T., Hunt, J. R., Trethowan, R. M., & Trevaskis, B. (2020). Phenology and related traits for wheat adaptation. *Heredity*, *125*(6), 417–430. https://doi.org/10.1038/s41437-020-0320-1

ICC. (1995). *Determination of the «Falling Number» according to Hagberg-Perten as a measure of the degree of alpha-amylase activity in grain and flour* (No. 107/1). International Association for Cereal Science and Technology.

ICC 115/1. (1992). *Method for using the Brabender farinograph* (No. 115/1). International Association for Cereal Science and Technology.

ICC 121/2. (1992). *Method for using the Chopin Alveograph* (No. 121/2). International Association for Cereal Science and Technology.

Igrejas, G., & Branlard, G. (2020). The importance of wheat. In G. Igrejas, T. M. Ikeda, & C. Guzmán (A c. Di), *Wheat Quality For Improving Processing And*

Human Health (pp. 1–7). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3_1

Ji, T., Ma, F., & Baik, B. (2020). Biochemical characteristics of soft wheat grain associated with endosperm separation from bran and flour yield. *Cereal Chemistry*, *97*(3), 566–572. https://doi.org/10.1002/cche.10271

Jødal, A.-S. S., & Larsen, K. L. (2021). Investigation of the relationships between the alveograph parameters. *Scientific Reports*, *11*(1), 5349. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84959-3

Jolly, C. J., Glenn, G. M., & Rahman, S. (1996). GSP-1 genes are linked to the grain hardness locus (Ha) on wheat chromosome 5D. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*(6), 2408–2413. https://doi.org/10.1073/pnas.93.6.2408

Kamal, N., Tsardakas Renhuldt, N., Bentzer, J., Gundlach, H., Haberer, G., Juhász, A., Lux, T., Bose, U., Tye-Din, J. A., Lang, D., Van Gessel, N., Reski, R., Fu, Y.-B., Spégel, P., Ceplitis, A., Himmelbach, A., Waters, A. J., Bekele, W. A., Colgrave, M. L., … Sirijovski, N. (2022). The mosaic oat genome gives insights into a uniquely healthy cereal crop. *Nature*, *606*(7912), 113–119. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04732-y

Kaya, Y., & Sahin, M. (2015). Non-parametric stability analyses of dough properties in wheat. *Food Science and Technology*, *35*(3), 509–515. https://doi.org/10.1590/1678-457X.6642

Kellogg, E. A. (2001). Evolutionary history of the grasses. *Plant Physiology*, *125*(3), 1198–1205. https://doi.org/10.1104/pp.125.3.1198

Kellogg, E. A. (2015). Inflorescence structure. In E. A. Kellogg, *Flowering Plants. Monocots* (pp. 25–38). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15332-2_2

Kern & Sohn GmbH. (2016). *Manuale d'istruzioni per uso – Termobilancia elettronica KERN DAB* (DAB-BA-I-1612).

Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M. F. (2023). Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*, *10*, 1053196. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1053196

Khatkar, B. S., Bell, A. E., & Schofield, J. D. (1996). A comparative study of the inter-relationships between mixograph parameters and bread-making. Qualities of wheat flours and glutens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *72*(1), 71–85. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199609)72:1%253C71::AID-JSFA625%253E3.0.CO;2-4

Kibkalo, I. (2022). Effectiveness of and perspectives for the sedimentation analysis method in grain quality evaluation in various cereal crops for breeding purposes. *Plants*, *11*(13), 1640. https://doi.org/10.3390/plants11131640

Kim, Y. S., & Flores, R. A. (1999). Determination of bran contamination in wheat flours using ash content, color, and bran speck counts. *Cereal Chemistry*, *76*(6), 957–961. https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.6.957

Kirby, E. J. M. (2002). Botany of the wheat plant. In B. C. Curtis, Rajaram, S, & Gómez Macpherson, H. (A c. Di), *Bread Wheat: Improvement and Production* (FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)). https://www.fao.org/4/y4011e/y4011e05.htm

Kirby, E. J. M., Appleyard, M., & Simpson, N. A. (1994). Co-ordination of stem elongation and Zadoks growth stages with leaf emergence in wheat and barley. *The Journal of Agricultural Science*, *122*(1), 21–29. https://doi.org/10.1017/S0021859600065746

Krishnamurthy, K., & Giroux, M. J. (2001). Expression of wheat puroindoline genes in transgenic rice enhances grain softness. *Nature Biotechnology*, *19*(2), 162–166. https://doi.org/10.1038/84435

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, *47*(260), 583–621. https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441

Lachman, J., Martinek, P., Kotíková, Z., Orsák, M., & Šulc, M. (2017). Genetics and chemistry of pigments in wheat grain – A review. *Journal of Cereal Science*, *74*, 145–154. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.02.007

Lama, S., Leiva, F., Vallenback, P., Chawade, A., & Kuktaite, R. (2023). Impacts of heat, drought, and combined heat–drought stress on yield, phenotypic traits, and gluten protein traits: Capturing stability of spring wheat in excessive environments. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1179701. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1179701

Lang, C. E., Neises, E. K., & Walker, C. E. (1992). Effects of additives on flour-water dough mixograms. *Cereal Chemistry*, *69*, 587–591.

Laubin, B., Lullien-Pellerin, V., Nadaud, I., Gaillard-Martinie, B., Chambon, C., & Branlard, G. (2008). Isolation of the wheat aleurone layer for 2D electrophoresis and proteomics analysis. *Journal of Cereal Science*, *48*(3), 709–714. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.03.004

Lebert, L., Buche, F., Sorin, A., & Aussenac, T. (2022). The wheat aleurone layer: Optimisation of its benefits and application to bakery products. *Foods*, *11*(22), 3552. https://doi.org/10.3390/foods11223552

Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. In I. Olkin (A c. Di), *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling* (pp. 278–292). Stanford University Press.

Levy, A. A., & Feldman, M. (2022). Evolution and origin of bread wheat. *The Plant Cell*, *34*(7), 2549–2567. https://doi.org/10.1093/plcell/koac130

Lyford, C. P., Kidd, W., Rayas-Duarte, P., & Deyoe, C. (2005). Prediction of flour extraction rate in hard red winter wheat using the single kernel characterization†. *Journal of Food Quality*, *28*(3), 279–288. https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2005.00036.x

Ma, S., Hou, J., Wang, Y., Wang, M., Zhang, W., Fan, Y., & Huang, Z. (2022). Post-flowering soil waterlogging curtails grain yield formation by restricting assimilates supplies to developing grains. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 944308. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.944308

Manley, M. (2014). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: Non-destructive analysis of biological materials. *Chem. Soc. Rev.*, *43*(24), 8200–8214. https://doi.org/10.1039/C4CS00062E

Mariotti, M., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2002). Processi di panificazione e qualità del pane. *Molini d'Italia*, *9*, 53–61.

Matengu, T. T., Bullock, P. R., Mkhabela, M. S., Zvomuya, F., Henriquez, M. A., Ojo, E. R., & Fernando, W. G. D. (2024). Weather-based models for forecasting

FUSARIUM HEAD BLIGHT risks in wheat and barley: A review. *Plant Pathology*, *73*(3), 492–505. https://doi.org/10.1111/ppa.13839

Matsuoka, Y. (2011). Evolution of polyploid Triticum wheats under cultivation: The role of domestication, natural hybridization and allopolyploid speciation in their diversification. *Plant and Cell Physiology*, *52*(5), 750–764. https://doi.org/10.1093/pcp/pcr018

McMaster, G. S. (1997). Phenology, development, and growth of the wheat (Triticum aestivum L.) shoot apex: A review. In *Advances in Agronomy* (Vol. 59, pp. 63–118). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60053-X

Meredith, P. (1983). The role of the amylograph in assessing sprout damage. In J. E. Kruger & D. E. LaBerge (A c. Di), *Third International Symposium on Pre-Harvest Sprouting in Cereals* (pp. 119–124). CRC Press.

Metakovsky, E., Pascual, L., Vaccino, P., Melnik, V., Rodriguez-Quijano, M., Popovych, Y., Chebotar, S., & Rogers, W. J. (2021). Heteroalleles in common wheat: Multiple differences between allelic variants of the Gli-B1 locus. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(4), 1832. https://doi.org/10.3390/ijms22041832

Morris, C. F. (2002). Puroindolines: The molecular genetic basis of wheat grain hardness. *Plant Molecular Biology*, *48*(5–6), 633–647. https://doi.org/10.1023/A:1014837431178

Morris, C. F., Geng, H., Beecher, B. S., & Ma, D. (2013). A review of the occurrence of Grain softness protein-1 genes in wheat (Triticum aestivum L.). *Plant Molecular Biology*, *83*(6), 507–521. https://doi.org/10.1007/s11103-013-0110-8

Muqaddasi, Q. H., Muqaddasi, R. K., Ebmeyer, E., Korzun, V., Argillier, O., Mirdita, V., Reif, J. C., Ganal, M. W., & Röder, M. S. (2023). Genetic control and prospects of predictive breeding for European winter wheat's Zeleny sedimentation values and Hagberg-Perten falling number. *Theoretical and Applied Genetics*, *136*(11), 229. https://doi.org/10.1007/s00122-023-04450-7

Nash, D., Lanning, S. P., Fox, P., Martin, J. M., Blake, N. K., Souza, E., Graybosch, R. A., Giroux, M. J., & Talbert, L. E. (2006). Relationship of dough extensibility to dough strength in a spring wheat cross. *Cereal Chemistry*, *83*(3), 255–258. https://doi.org/10.1094/CC-83-0255

Nasir, M., Butt, M. S., Anjum, F. M., Sharif, K., & Minhas, R. (2003). Effect of moisture on the shelf life of wheat flour. *International Journal of Agriculture & Biology*, *5*(4), 458–459.

Ormoli, l., Negri, S., Perenzin, M., Vaccino, P., & Costa, C. (2015). Diversity trends in bread wheat in Italy during the 20th century assessed by traditional and multivariate approaches. *Scientific Reports*, *5*, 8574. https://doi.org/10.1038/srep08574

Osborne, T. B. (1907). *The proteins of the wheat kernel*. Carnegie Institution of Washington.

Pasqua, G., Abate, G., & Forni, C. (2015). *Botanica generale e diversità vegetale* (3ª ed.). Piccin.

Payne, P. I. (1987). Genetics of wheat storage proteins and the effect of allelic variation on bread-making quality. *Annual Review of Plant Physiology*, *38*, 141–153.

Payne, P. I., Holt, L. M., Lawrence, G. J., & Law, C. N. (1982). The genetics of gliadin and glutenin, the major storage proteins of the wheat endosperm. *Qualitas Plantarum Plant Foods for Human Nutrition*, *31*(3), 229–241. https://doi.org/10.1007/BF01108632

Peleg, Z., Abbo, S., & Gopher, A. (2022). When half is more than the whole: Wheat domestication syndrome reconsidered. *Evolutionary Applications*, *15*(12), 2002–2009. https://doi.org/10.1111/eva.13472

Peng, J., Richards, D. E., Hartley, N. M., Murphy, G. P., Devos, K. M., Flintham, J. E., Beales, J., Fish, L. J., Worland, A. J., Pelica, F., Sudhakar, D., Christou, P., Snape, J. W., Gale, M. D., & Harberd, N. P. (1999). 'Green revolution' genes encode mutant gibberellin response modulators. *Nature*, *400*(6741), 256–261. https://doi.org/10.1038/22307

Peng, J., Sun, D., & Nevo, E. (2011). Domestication evolution, genetics and genomics in wheat. *Molecular Breeding*, *28*(3), 281–301. https://doi.org/10.1007/s11032-011-9608-4

Peressini, D. (2017). Valutazione della qualità tecnologica del frumento mediante indici reologici di tipo fondamentale. *Bollettino Panta Rei*, *17*, 5–13.

Peršić, V., Božinović, I., Varnica, I., Babić, J., & Španić, V. (2023). Impact of Fusarium head blight on wheat flour quality: Examination of protease activity, technological quality and rheological properties. *Agronomy*, *13*(3), 662. https://doi.org/10.3390/agronomy13030662

Perten, H. (1964). Application of the Falling Number method for evaluating alpha-amylase activity. *Cereal Chemistry*, *41*(3), 127–140.

Pojić, M., Hadnađev, M., & Hadnađev, T. D. (2013). Gelatinization properties of wheat flour as determined by empirical and fundamental rheometric method. *European Food Research and Technology*, *237*(3), 299–307. https://doi.org/10.1007/s00217-013-1991-0

Preiti, G., Calvi, A., Giuffrè, A. M., Badagliacca, G., Virzì, N., & Bacchi, M. (2022). A comparative assessment of agronomic and baking qualities of modern/old varieties and landraces of wheat grown in Calabria (Italy). *Foods*, *11*(15), 2359. https://doi.org/10.3390/foods11152359

Preston, K. R., & Hoseney, R. C. (1991). Applications of the extensigraph. In *The Extensigraph Handbook*. AACC International, Inc.

Preston, K. R., March, P. R., & Tipples, K. H. (1982). "An assessment of the SDS-sedimentation test for the prediction of Canadian bread wheat quality. *Canadian Journal of Plant Science*, *62*(3), 545–553. https://doi.org/10.4141/cjps82-083

R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (Versione 4.5) [Software]. https://www.r-project.org

Rahman, S., Islam, S., Yu, Z., She, M., Nevo, E., & Ma, W. (2020). Current progress in understanding and recovering the wheat genes lost in evolution and domestication. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(16), 5836. https://doi.org/10.3390/ijms21165836

Rakita, S., Torbica, A., Dokic, L., Tomic, J., Pojic, M., Hadnadjev, M., & Hadnadjev-Dapcevic, T. (2015). Alpha-amylase activity in wheat flour and breadmaking properties in relation to different climatic conditions. *Food and Feed Research*, *42*(2), 91–99. https://doi.org/10.5937/FFR1502092R

Rakita, S., Torbica, A., Pezo, L., & Nikolić, I. (2023). Effect of climatic conditions on wheat starch granule size distribution, gelatinization and flour pasting properties. *Agronomy*, *13*(6), 1551. https://doi.org/10.3390/agronomy13061551

Rath, C. R., Gras, P. W., Walker, C. E., & Wrigley, C. V. (1990). Evaluation of dough properties from two grams of flour using the mixograph principle. *Cereal Foods World*, *35*, 572–574.

Rosa-Sibakov, N., Poutanen, K., & Micard, V. (2015). How does wheat grain, bran and aleurone structure impact their nutritional and technological properties? *Trends in Food Science & Technology*, *41*(2), 118–134. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.10.003

Ruggeri, M., Vinci, G., Prencipe, S. A., Vieri, S., & Maddaloni, L. (2025). Italian ancient wheats: Historical, agronomic, and market characteristics: a comprehensive review. *Agriculture*, *15*(22), 2375. https://doi.org/10.3390/agriculture15222375

Sabelli, P. A., & Shewry, P. R. (1991). Characterization and organization of gene families at the Gli-1 loci of bread and durum wheats by restriction fragment analysis. *Theoretical and Applied Genetics*, *83*(2), 209–216. https://doi.org/10.1007/BF00226253

Sakhare, S. D., & Inamdar, A. A. (2014). The cumulative ash curve: A best tool to evaluate complete mill performance. *Journal of Food Science and Technology*, *51*(4), 795–799. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0549-z

Salvi, S., Porfiri, O., & Ceccarelli, S. (2013). Nazareno Strampelli, the «prophet» of the Green Revolution. *The Journal of Agricultural Science*, *151*(1), 1–5. https://doi.org/10.1017/S0021859612000214

Schaal, B. (2019). Plants and people: Our shared history and future. *PLANTS, PEOPLE, PLANET*, *1*(1), 14–19. https://doi.org/10.1002/ppp3.12

Schreiber, M., Özkan, H., Komatsuda, T., & Mascher, M. (2021). Evolution and domestication of rye. In M. T. Rabanus-Wallace & N. Stein (A c. Di), *The Rye Genome* (pp. 85–100). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83383-1_6

Seabourn, B. W., Xiao, Z. S., Tilley, M., Herald, T. J., & Park, S. (2012). A rapid, small-scale sedimentation method to predict breadmaking quality of hard winter wheat. *Crop Science*, *52*(3), 1306–1315. https://doi.org/10.2135/cropsci2011.04.0210

Sears, E. R. (1976). Genetic control of chromosome pairing in wheat. *Annual Review of Genetics*, *10*(1), 31–51. https://doi.org/10.1146/annurev.ge.10.120176.000335

Sedláček, T., & Švec, I. (2023). Water absorption of food wheat flour – comparison of direct and indirect methods. *Croatian journal of food science and technology*, *15*(2), 163–172. https://doi.org/10.17508/CJFST.2023.15.2.04

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, *52*(3–4), 591–611. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591

Shewry, P. R. (2023). Wheat grain proteins: Past, present, and future. *Cereal Chemistry*, *100*(1), 9–22. https://doi.org/10.1002/cche.10585

Shewry, P. R., & Halford, N. (2002). Cereal seed storage proteins: Structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, *53*(370), 947–958. https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.947

Shewry, P. R., Hawkesford, M., Piironen, V., Lampi, A.-M., Gebruers, K., Boros, D., Andersson, A. A. M., Åman, P., Rakszegi, M., Bedo, Z., & Ward, J. L. (2013). Natural Variation in Grain Composition of Wheat and Related Cereals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *61*(35), 8295–8303. https://doi.org/10.1021/jf3054092

Shewry, P. R., & Tatham, A. S. (1997). Disulphide bonds in wheat gluten proteins. *Journal of Cereal Science*, *25*(3), 207–227. https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0100

Soreng, R. J., Peterson, P. M., Romaschenko, K., Davidse, G., Teisher, J. K., Clark, L. G., Barberá, P., Gillespie, L. J., & Zuloaga, F. O. (2017). A worldwide phylogenetic classification of the Poaceae (Gramineae) II: An update and a comparison of two 2015 classifications. *Journal of Systematics and Evolution*, *55*(4), 259–290. https://doi.org/10.1111/jse.12262

Strelec, I., Mrša, V., Simović, D. Š., Petrović, J., Zahorec, J., & Budžaki, S. (2024). Biochemical and quality parameter changes of wheat grains during one-year storage under. Different storage conditions. *Sustainability*, *16*(3), 1155. https://doi.org/10.3390/su16031155

Surget, A., & Barron, C. (2005). *Histologie du grain de blé. 145*, 3–7.

Tauger, M. B. (2023). Nazareno Strampelli and the first Green Revolution. *Journal of International Development*, *35*(8), 2485–2512. https://doi.org/10.1002/jid.3785

The jamovi project. (2025). *Jamovi* (Versione 2.7) [Software]. https://www.jamovi.org

Tian, S., Zhang, M., Li, J., Wen, S., Bi, C., Zhao, H., Wei, C., Chen, Z., Yu, J., Shi, X., Liang, R., Xie, C., Li, B., Sun, Q., Zhang, Y., & You, M. (2021). Identification and validation of stable quantitative trait loci for SDS-

sedimentation volume in common wheat (Triticum aestivum L.). *Frontiers in Plant Science*, *12*, 747775. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.747775

Tsen, C. C. (1969). Effects of oxidising and reducing agents on changes of flour proteins during dough mixing. *Cereal Chemistry*, *46*, 435–442.

Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, *5*(2), 99. https://doi.org/10.2307/3001913

Turnbull, K.-M., & Rahman, S. (2002). Endosperm Texture in Wheat. *Journal of Cereal Science*, *36*(3), 327–337. https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0468

Utebayev, M., Dashkevich, S., Bome, N., Bulatova, K., & Shavrukov, Y. (2019). Genetic diversity of gliadin-coding alleles in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) from Northern Kazakhstan. *PeerJ*, *7*, e7082. https://doi.org/10.7717/peerj.7082

Veraverbeke, W. S., & Delcour, J. A. (2002). Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *42*(3), 179–208. https://doi.org/10.1080/10408690290825510

Vicentini, A., Barber, J. C., Aliscioni, S. S., Giussani, L. M., & Kellogg, E. A. (2008). The age of the grasses and clusters of origins of C_4 photosynthesis. *Global Change Biology*, *14*(12), 2963–2977. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01688.x

Wang, H. L., Offler, C. E., & Patrick, J. W. (1994). Nucellar projection transfer cells in the developing wheat grain. *Protoplasma*, *182*(1–2), 39–52. https://doi.org/10.1007/BF01403687

Wang, K., & Fu, B. X. (2020). Inter-relationships between test weight, thousand kernel weight, kernel size distribution and their effects on durum wheat milling, semolina composition and pasta processing quality. *Foods*, *9*(9), 1308. https://doi.org/10.3390/foods9091308

Wang, L., & Flores, R. A. (2000). Effects of flour particle size on the textural properties of flour tortillas. *Journal of Cereal Science*, *31*(3), 263–272. https://doi.org/10.1006/jcrs.2000.0302

Wang, Z., Wang, W., Xie, X., Wang, Y., Yang, Z., Peng, H., Xin, M., Yao, Y., Hu, Z., Liu, J., Su, Z., Xie, C., Li, B., Ni, Z., Sun, Q., & Guo, W. (2022). Dispersed emergence and protracted domestication of polyploid wheat uncovered by mosaic ancestral haploblock inference. *Nature Communications*, *13*(1), 3891. https://doi.org/10.1038/s41467-022-31581-0

Welch, B. L. (1951). On the comparison of several mean values: An alternative approach. *Biometrika*, *38*(3–4), 330–336. https://doi.org/10.1093/biomet/38.3-4.330

Wieser, H. (2007). Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiology*, *24*(2), 115–119. https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.07.004

Wieser, H., & Kieffer, R. (2001). Correlations of the amount of gluten protein types to the technological properties of wheat flours determined on a micro-scale. *Journal of Cereal Science*, *34*(1), 19–27. https://doi.org/10.1006/jcrs.2000.0385

Wieser, H., Koehler, P., & Scherf, K. A. (2020). Chemical composition of wheat grains. In *Wheat—An Exceptional Crop* (pp. 13–45). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821715-3.00002-2

Wieser, H., Koehler, P., & Scherf, K. A. (2023). Chemistry of wheat gluten proteins: Qualitative composition. *Cereal Chemistry*, *100*(1), 23–35. https://doi.org/10.1002/cche.10572

Wu, X., Li, G., Shen, Y., Wu, W., & Li, Z. (2026). Nondestructive determination of ash content in wheat flour via terahertz time-domain spectroscopy. *Frontiers in Plant Science*, *17*, 1843188. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1843188

Xiong, F., Yu, X.-R., Zhou, L., Wang, Z., Wang, F., & Xiong, A.-S. (2013). Structural development of aleurone and its function in common wheat. *Molecular Biology Reports*, *40*(12), 6785–6792. https://doi.org/10.1007/s11033-013-2795-9

Yazar, G. (2023). Wheat flour quality assessment by fundamental non-linear rheological methods: A critical review. *Foods*, *12*(18), 3353. https://doi.org/10.3390/foods12183353

Yu, X., Li, B., Wang, L., Chen, X., Wang, W., Wang, Z., & Xiong, F. (2015). Systematic analysis of pericarp starch accumulation and degradation during wheat caryopsis development. *PLOS ONE*, *10*(9), e0138228. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138228

Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, *14*(6), 415–421. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x

Zeleny, L. (1962). *Wheat sedimentation test*. 40th Annual Agricultural Outlook Conference, Washington, DC.

Zhan, M., Zhang, L., Lei, X., Wan, C., Lin, D., Yu, P., Yang, X., & Zhao, A. (2005). Phytic acid in wheat grains: A bioactive component with dual roles in food and

health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *24*(5), e707257. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70257

Žilić, S. (2013). Wheat gluten: Composition and health effects. In D. B. Walter (A c. Di), *Gluten: Sources, Composition and Health Effects* (pp. 71–86). Nova Science Publishers.

Zohary Daniel, Hopf Maria, & Weiss Ehud. (2012). *Domestication of plants in the Old World: The origin and spread of domesticated plants in Southwest Asia, Europe, and the Mediterranean Basin* (4ª ed.). Oxford University Press.

8 ALLEGATI

Tabella 8.1. Analisi Annata 2023

Varietà	GRANELLA E MACINAZIONE									NIR SFARINATO INTEGRALE			SDS			NIR FARINA					ALVEOGRAFO							FARINOGRAFO					
	Durezza	Peso ettolitrico (kg/hL)	Peso 1000 semi (g)	Peso granella (g)	Peso crusca (g)	Peso cruschello (g)	Peso farina (g)	Resa macinazione (%)	Falling Number (s)	Umidità (%)	Proteine (% s.s.)	Ceneri (% s.s.)	Lettura 1 (mL)	Lettura 2 (mL)	Media (mL)	Umidità (%)	Proteine (% s.s.)	Glutine umido (%)	Assorbimento acqua (mL/100 g)	Ceneri (% s.s.)	Umidità (%)	G	P (mm)	L (mm)	P/L	W ($\times 10^{-4}$ J)	Ie (%)	Assorbimento acqua (%)	Assorbimento corretto 500 UF (%)	Sviluppo (min)	Stabilità (min)	Rammollimento 10' (UB)	Rammollimento ICC 12' (UB)
Canove	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	396	n.d.	14,9	n.d.	n.d.	n.d.	39,5	n.d.	13,3	n.d.	n.d.	n.d.	12,0	24,2	29	118	0,25	63	n.d.	53,7	n.d.	1,6	1,6	n.d.	106
Cologna 12	M	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	382	n.d.	14,4	n.d.	n.d.	n.d.	40,0	n.d.	12,9	n.d.	n.d.	n.d.	11,9	23,6	34	112	0,30	76	n.d.	55,2	n.d.	2,7	2,6	n.d.	107
Gentil Rosso 48	M	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	240	n.d.	17,9	n.d.	n.d.	n.d.	45,0	n.d.	17,7	n.d.	n.d.	n.d.	11,9	24,6	27	122	0,22	44	n.d.	57,5	n.d.	1,9	3,3	n.d.	134
Gua' 113	S	n.d.	n.d.	2600	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	391	n.d.	13,5	n.d.	n.d.	n.d.	35,5	n.d.	12,2	n.d.	n.d.	n.d.	12,1	19,9	17	80	0,21	23	n.d.	52,4	n.d.	1,4	1,3	n.d.	232
Lama	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	358	n.d.	12,7	n.d.	n.d.	n.d.	23,0	n.d.	11,0	n.d.	n.d.	n.d.	12,0	17,8	21	64	0,33	30	n.d.	54,3	n.d.	1,5	1,6	n.d.	158
Leonardo	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	372	n.d.	14,2	n.d.	n.d.	n.d.	37,0	n.d.	12,7	n.d.	n.d.	n.d.	12,0	26,5	33	142	0,23	83	n.d.	54,6	n.d.	2,9	4,1	n.d.	76
Leonardo 44	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	325	n.d.	14,3	n.d.	n.d.	n.d.	37,5	n.d.	12,7	n.d.	n.d.	n.d.	12,6	23,7	34	113	0,30	79	n.d.	52,5	n.d.	1,6	5,2	n.d.	78
Leone	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	233	n.d.	11,3	n.d.	n.d.	n.d.	29,5	n.d.	12,7	n.d.	n.d.	n.d.	12,3	22,0	27	98	0,28	47	n.d.	53,2	n.d.	1,4	2,7	n.d.	130
Leone 129	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	391	n.d.	13,0	n.d.	n.d.	n.d.	33,5	n.d.	11,6	n.d.	n.d.	n.d.	12,4	14,6	21	43	0,49	20	n.d.	53,2	n.d.	1,6	2,4	n.d.	207
Leopardo	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	455	n.d.	14,2	n.d.	n.d.	n.d.	36,5	n.d.	12,5	n.d.	n.d.	n.d.	12,3	24,8	23	124	0,19	60	n.d.	51,3	n.d.	3,6	5,6	n.d.	88
Lepre	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	372	n.d.	12,6	n.d.	n.d.	n.d.	32,0	n.d.	10,8	n.d.	n.d.	n.d.	12,0	17,7	28	63	0,44	37	n.d.	53,9	n.d.	1,3	2,2	n.d.	184
Libellula	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	451	n.d.	13,6	n.d.	n.d.	n.d.	36,0	n.d.	11,5	n.d.	n.d.	n.d.	12,5	23,6	35	112	0,31	77	n.d.	55,9	n.d.	2,0	2,4	n.d.	131
Lince	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	374	n.d.	14,7	n.d.	n.d.	n.d.	30,0	n.d.	13,2	n.d.	n.d.	n.d.	12,0	24,2	28	118	0,24	58	n.d.	55,1	n.d.	1,8	2,1	n.d.	115
Liocorno	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	436	n.d.	14,3	n.d.	n.d.	n.d.	32,0	n.d.	13,0	n.d.	n.d.	n.d.	12,2	20,3	28	83	0,34	51	n.d.	53,7	n.d.	1,3	8,8	n.d.	61
Lo 1014	M	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	519	n.d.	11,6	n.d.	n.d.	n.d.	39,0	n.d.	10,7	n.d.	n.d.	n.d.	11,9	20,5	52	85	0,61	135	n.d.	53,8	n.d.	1,6	8,6	n.d.	65
Lo 228	M	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	777	n.d.	14,6	n.d.	n.d.	n.d.	44,5	n.d.	13,7	n.d.	n.d.	n.d.	12,0	24,7	45	123	0,37	121	n.d.	57,6	n.d.	2,3	5,0	n.d.	78
Lo 3	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	700	n.d.	14,2	n.d.	n.d.	n.d.	32,0	n.d.	12,5	n.d.	n.d.	n.d.	11,8	21,1	29	90	0,32	50	n.d.	54,6	n.d.	1,7	2,6	n.d.	125
Lo 65	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	512	n.d.	12,9	n.d.	n.d.	n.d.	35,0	n.d.	11,5	n.d.	n.d.	n.d.	12,3	23,6	28	112	0,25	53	n.d.	54,6	n.d.	2,6	2,5	n.d.	122
Lonigo 1	M	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	231	n.d.	15,3	n.d.	n.d.	n.d.	41,0	n.d.	13,7	n.d.	n.d.	n.d.	12,0	27,3	38	150	0,25	114	n.d.	56,1	n.d.	2,8	3,7	n.d.	77
Lontra	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	393	n.d.	12,5	n.d.	n.d.	n.d.	33,0	n.d.	11,6	n.d.	n.d.	n.d.	11,9	19,1	52	74	0,70	94	n.d.	57,2	n.d.	2,0	4,8	n.d.	92
Lucciola	M	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	345	n.d.	12,6	n.d.	n.d.	n.d.	31,0	n.d.	11,1	n.d.	n.d.	n.d.	11,9	20,9	38	88	0,43	71	n.d.	55,2	n.d.	2,2	3,7	n.d.	130
Lupetto	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	290	n.d.	11,8	n.d.	n.d.	n.d.	30,5	n.d.	10,5	n.d.	n.d.	n.d.	12,4	23,9	32	115	0,28	71	n.d.	53,3	n.d.	1,7	3,8	n.d.	92
Lupo	M	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	386	n.d.	13,6	n.d.	n.d.	n.d.	29,5	n.d.	12,5	n.d.	n.d.	n.d.	12,4	20,9	25	88	0,28	43	n.d.	54,8	n.d.	1,3	1,5	n.d.	169
Mentana	S	n.d.	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	318	n.d.	14,4	n.d.	n.d.	n.d.	39,0	n.d.	12,9	n.d.	n.d.	n.d.	11,6	17,8	21	64	0,33	28	n.d.	55,1	n.d.	1,6	1,9	n.d.	180
Piave	S	n.d.	n.d.	2600	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	315	n.d.	13,3	n.d.	n.d.	n.d.	42,5	n.d.	11,9	n.d.	n.d.	n.d.	11,8	19,8	32	79	0,41	48	n.d.	57,6	n.d.	1,8	1,3	n.d.	210
Bologna (FF)	M	81,4	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	420	n.d.	14,6	n.d.	n.d.	n.d.	64,0	n.d.	13,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	25,8	60	134	0,45	240	n.d.	57,7	n.d.	3,2	18,3	n.d.	0
Rebelde (FF)	M	81,8	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	466	n.d.	15,5	n.d.	n.d.	n.d.	72,0	n.d.	13,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	19,7	67	78	0,86	163	n.d.	55,9	n.d.	2,2	14,7	n.d.	13
Algeri (FPS)	M	80,0	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	405	n.d.	13,9	n.d.	n.d.	n.d.	68,0	n.d.	12,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	24,8	43	124	0,35	117	n.d.	56,0	n.d.	1,9	7,9	n.d.	66
Solehio (FP)	M	79,4	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	405	n.d.	12,5	n.d.	n.d.	n.d.	55,0	n.d.	9,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	20,3	50	83	0,60	131	n.d.	53,2	n.d.	1,3	14,3	n.d.	29
Modern (FB)	M	77,0	n.d.	2500	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	330	n.d.	12,8	n.d.	n.d.	n.d.	51,0	n.d.	10,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	22,7	36	104	0,35	79	n.d.	53,4	n.d.	1,6	8,1	n.d.	59
Media±DS varietà storiche (n=25)		n.d.	n.d.	2508±28	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	398±127	n.d.	13,7±1,4	n.d.	n.d.	n.d.	35,4±5,3	n.d.	12,4±1,4	n.d.	n.d.	n.d.	12,1±0,3	21,9±3,1	31±9	98±27	0,33±0,12	63±30	n.d.	54,7±1,7	n.d.	1,9±0,6	3,4±2,0	n.d.	126±48
Media±DS 17 varietà comuni		n.d.	n.d.	2500±0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	430±137	n.d.	13,2±1,0	n.d.	n.d.	n.d.	33,6±4,8	n.d.	11,9±0,9	n.d.	n.d.	n.d.	12,2±0,2	21,5±3,1	32±10	95±26	0,36±0,14	66±31	n.d.	54,3±1,6	n.d.	1,9±0,6	4,0±2,2	n.d.	117±43
Media±DS 5 testimoni		79,9±1,9	n.d.	2500±0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	405±49	n.d.	13,9±1,2	n.d.	n.d.	n.d.	62,0±8,8	n.d.	11,9±1,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	22,7±2,7	51±13	105±25	0,52±0,21	146±61	n.d.	55,2±1,9	n.d.	2,0±0,7	12,7±4,5	n.d.	33±29

n.d. = dato non disponibile. Durezza: S = soft, M = medium. Testimoni: FF = frumento di forza; FPS = frumento panificabile superiore; FP = frumento panificabile; FB = frumento biscottiero. DS = deviazione standard.

Tabella 8.2. Analisi Annata 2024

Varietà	GRANELLA E MACINAZIONE									NIR SFARINATO INTEGRALE			SDS			NIR FARINA					ALVEOGRAFO							FARINOGRAFO					
	Durezza	Peso ettolitrico (kg/hL)	Peso 1000 semi (g)	Peso granella (g)	Peso cruscа (g)	Peso crusichello (g)	Peso farina (g)	Resa macinazione (%)	Falling Number (s)	Umidità (%)	Proteine (% s.s.)	Ceneri (% s.s.)	Lettura 1 (mL)	Lettura 2 (mL)	Media (mL)	Umidità (%)	Proteine (% s.s.)	Glutine umido (%)	Assorbimento acqua (mL/100 g)	Ceneri (% s.s.)	Umidità (%)	G	P (mm)	L (mm)	P/L	W ($\times 10^{-4}$ J)	Ie (%)	Assorbimento acqua (%)	Assorbimento corretto 500 UF (%)	Sviluppo (min)	Stabilità (min)	Rammollimento 10' (UB)	Rammollimento ICC 12' (UB)
Abbondanza	S	n.d.	45,0	2800	551	619	1447	51,7	267	12,5	12,3	1,79	42,0	44,0	43,0	13,6	10,7	28,1	52,0	0,47	14,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,8	55,1	1,7	4,9	67	92
Agrella 2	S	n.d.	43,0	2800	430	871	1417	50,6	222	11,8	15,3	2,15	76,0	78,0	77,0	14,4	14,6	32,9	58,3	0,56	15,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	58,0	59,5	10,4	16,2	3	0
Canove	S	n.d.	42,5	2800	510	676	1470	52,5	213	11,7	14,4	1,90	32,0	34,0	33,0	14,2	12,7	31,8	56,2	0,57	15,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	60,0	59,7	2,0	1,7	167	208
Cologna 12	S	n.d.	42,5	2800	532	640	1473	52,6	260	12,1	12,3	1,84	33,0	35,0	34,0	13,6	10,8	28,1	52,7	0,49	14,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	56,6	55,4	2,2	2,4	122	170
Gentil Rosso 48	M	n.d.	42,5	2800	559	569	1400	50,0	249	12,2	13,2	1,83	34,0	36,0	35,0	14,6	11,0	28,1	53,5	0,50	15,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	53,6	52,5	1,3	3,0	90	115
Gua' 113	S	n.d.	38,0	2800	517	650	1480	52,9	328	12,0	12,7	1,92	36,0	39,0	37,5	14,4	11,1	28,0	50,5	0,54	14,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	54,0	53,1	1,5	3,3	97	111
Lama	S	n.d.	44,0	2800	531	620	1510	53,9	246	12,6	11,7	1,75	32,0	33,0	32,5	13,7	10,8	28,8	51,0	0,47	15,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,0	54,8	1,6	3,0	103	124
Lampo	S	n.d.	39,0	2800	570	562	1505	53,8	260	12,6	13,0	1,81	49,0	49,0	49,0	13,9	11,2	27,9	55,0	0,50	14,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	53,5	52,8	1,5	5,0	48	52
Leonardo	S	n.d.	44,0	2800	516	655	1499	53,5	204	12,5	12,0	1,80	34,0	39,0	36,5	13,5	10,8	27,9	52,1	0,51	11,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,0	55,1	1,5	3,4	97	124
Leonardo 44	S	n.d.	43,0	2800	565	628	1464	52,3	163	12,6	11,9	1,77	39,0	40,0	39,5	14,0	10,8	27,9	51,5	0,50	14,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	57,0	55,0	1,6	4,0	68	84
Leone	S	n.d.	44,0	2800	541	622	1492	53,3	152	12,3	11,9	1,45	46,0	42,0	44,0	14,3	11,4	27,8	51,6	0,54	15,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	54,0	55,0	1,6	2,4	129	164
Leone 129	S	n.d.	38,0	2800	540	614	1516	54,1	189	12,1	12,6	1,60	44,0	47,0	45,5	14,5	11,1	27,5	51,5	0,53	15,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	54,0	54,6	1,8	3,6	103	127
Leopardo	S	n.d.	41,0	2800	580	560	1570	56,1	214	12,4	12,6	1,76	40,0	40,0	40,0	13,7	10,9	25,1	50,7	0,53	15,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	53,0	52,7	1,8	2,7	89	107
Lepre	S	n.d.	44,0	2800	544	700	1480	52,9	291	12,6	11,8	1,62	38,0	39,0	38,5	13,8	10,4	26,1	52,2	0,45	15,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	54,5	56,4	1,5	3,1	132	165
Libellula	S	n.d.	45,0	2800	526	711	1480	52,9	251	12,6	11,2	1,74	30,0	33,0	31,5	13,8	10,5	26,6	52,2	0,50	14,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	57,0	56,8	1,8	2,2	125	156
Lince	S	n.d.	47,0	2800	570	620	1505	53,8	241	12,5	13,0	1,86	38,0	40,0	39,0	14,1	11,0	26,4	51,6	0,57	15,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	56,0	56,3	1,3	3,3	94	136
Liocorno	S	n.d.	43,5	2800	580	590	1520	54,3	231	12,7	11,7	1,76	35,0	36,0	35,5	13,8	9,9	24,0	52,0	0,48	15,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	53,2	53,1	1,2	1,2	101	109
Lo 1014	M	n.d.	37,5	2800	521	762	1416	50,6	173	12,5	12,5	1,83	47,0	49,0	48,0	14,6	11,3	28,9	57,1	0,51	15,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,0	56,4	1,5	2,1	91	123
Lo 12 273	S	n.d.	46,0	2800	300	1140	1330	47,5	276	11,9	17,0	1,98	51,0	52,0	51,5	13,9	16,3	35,1	59,0	0,61	14,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	62,6	63,8	4,5	8,6	39	83
Lo 17	S	n.d.	48,0	2800	394	900	1439	51,4	81	12,5	13,3	1,76	48,0	50,0	49,0	14,0	12,1	29,6	58,1	0,54	14,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	59,5	58,0	1,7	2,3	111	148
Lo 228	M	n.d.	41,8	2800	445	747	1458	52,1	300	12,1	13,0	1,83	48,0	46,0	47,0	14,6	12,0	31,0	57,8	0,49	15,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	60,0	59,2	1,9	6,1	59	72
Lo 3	S	n.d.	43,0	2000	460	434	1083	54,1	183	12,6	13,3	1,72	33,0	35,0	34,0	14,5	11,2	26,0	52,2	0,59	15,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,0	55,0	1,6	2,1	152	190
Lo 3/58	S	n.d.	41,2	2800	500	690	1505	53,8	292	12,6	12,0	1,76	32,0	34,0	33,0	13,7	9,6	24,7	50,9	0,47	15,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	53,1	52,4	1,5	3,2	93	99
Lo 506	S	n.d.	53,5	2800	390	1000	1300	46,4	64	12,3	13,1	1,86	34,0	36,0	35,0	14,0	11,9	28,5	58,4	0,59	15,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	63,0	63,3	2,2	1,9	235	286
Lo 510	S	n.d.	46,0	2800	386	900	1402	50,1	227	12,4	11,7	1,94	60,0	60,0	60,0	14,4	10,8	26,6	57,9	0,51	15,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	58,2	58,9	1,6	2,2	103	120
Lo 518	S	n.d.	44,0	2800	393	870	1438	51,3	238	12,5	12,2	1,84	58,0	56,0	57,0	14,3	11,1	27,4	57,7	0,51	14,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	56,0	58,1	1,8	4,1	102	123
Lo 523	S	n.d.	35,0	2800	390	1000	1291	46,1	76	12,5	13,4	1,77	52,0	56,0	54,0	14,2	12,5	30,6	58,1	0,54	15,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	58,0	59,5	1,5	2,2	120	147
Lo 65	S	n.d.	43,5	2800	532	785	1360	48,6	319	12,4	12,7	1,73	42,0	44,0	43,0	13,7	10,9	27,8	53,8	0,45	14,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	59,0	58,4	2,6	3,6	65	91
Lonigo 1	S	n.d.	43,0	2800	599	643	1418	50,7	149	12,0	14,0	1,85	38,0	42,0	40,0	14,0	12,2	28,8	53,5	0,59	14,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	56,0	57,2	1,7	2,3	125	155
Lontra	S	n.d.	42,0	2800	547	720	1423	50,8	217	12,6	11,7	1,80	40,0	40,0	40,0	13,7	9,5	23,1	52,0	0,53	14,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,0	56,6	1,5	2,2	109	124
Lucciola	M	n.d.	42,0	2800	557	660	1355	48,4	229	12,6	12,3	1,86	32,0	36,0	34,0	13,7	9,9	26,0	52,3	0,52	15,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,0	56,5	1,3	2,7	120	138
Lupetto	S	n.d.	42,0	2800	518	659	1540	55,0	194	12,3	12,1	1,68	31,0	32,0	31,5	13,8	10,2	25,0	51,5	0,54	11,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	53,0	53,0	1,3	3,0	110	125
Lupo	M	n.d.	46,0	2800	570	590	1553	55,5	257	12,4	12,3	1,70	32,0	32,0	32,0	13,8	10,5	27,7	50,8	0,49	15,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,5	54,6	2,1	2,6	103	129
Mentana	S	n.d.	42,0	2800	538	648	1513	54,0	132	12,4	13,6	1,82	34,0	35,0	34,5	13,8	12,2	31,3	54,0	0,53	14,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	57,3	57,4	1,8	1,6	167	196
Piave	S	n.d.	47,0	2800	590	598	1490	53,2	110	12,5	14,6	1,78	44,0	46,0	45,0	13,6	11,7	29,3	53,1	0,54	14,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	56,0	58,4	1,3	1,5	214	252
Bologna (FF)	M	75,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	330	n.d.	13,6	n.d.	n.d.	n.d.	62,0	n.d.	12,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	21,5	47	93	0,51	136	n.d.	55,3	n.d.	2,5	11,2	n.d.	36
Rebelde (FF)	M	74,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	369	n.d.	14,6	n.d.	n.d.	n.d.	70,0	n.d.	13,4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	27,7	43	155	0,28	177	n.d.	56,7	n.d.	2,7	17,2	n.d.	18
Algeri (FPS)	M	73,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	170	n.d.	12,4	n.d.	n.d.	n.d.	58,0	n.d.	11,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	22,6	36	103	0,35	102	n.d.	54,9	n.d.	1,8	2,6	n.d.	100
Solehio (FP)	M	73,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	355	n.d.	11,9	n.d.	n.d.	n.d.	57,0	n.d.	10,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	20,4	42	84	0,50	117	n.d.	54,4	n.d.	1,5	7,7	n.d.	48
Modern (FB)	S	70,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	284	n.d.	10,3	n.d.	n.d.	n.d.	40,0	n.d.	8,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17,5	34	62	0,55	68	n.d.	51,7	n.d.	1,2	1,8	n.d.	105
Media±DS varietà storiche (n=35)		n.d.	43,1±3,3	2777±135	508±73	704±148	1444±92	52,0±2,4	214±67	12,4±0,3	12,8±1,2	1,80±0,12	41,0±10,0	42,4±9,6	41,7±9,8	14,0±0,3	11,3±1,3	28,0±2,5	53,8±2,8	0,52±0,04	14,8±0,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	56,2±2,6	56,4±2,8	2,0±1,6	3,4±2,6	107±44	133±53
Media±DS 17 varietà comuni		n.d.	42,6±2,2	2753±194	534±37	650±85	1454±113	52,8±2,2	224±48	12,5±0,2	12,2±0,5	1,73±0,10	37,8±6,0	39,0±5,3	38,4±5,6	14,0±0,4	10,7±0,6	26,9±2,0	52,5±2,0	0,51±0,04	14,8±1,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	55,3±2,0	55,5±1,8	1,7±0,3	2,9±1,1	103±25	127±30
Media±DS 5 testimoni		73,7±1,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	302±80	n.d.	12,6±1,6	n.d.	n.d.	n.d.	57,4±11,0	n.d.	11,0±1,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	21,9±3,7	40±5	99±35	0,44±0,12	120±40	n.d.	54,6±1,9	n.d.	1,9±0,6	8,1±6,4	n.d.	61±39

n.d. = dato non disponibile. Durezza: S = soft, M = medium. Testimoni: FF = frumento di forza; FPS = frumento panificabile superiore; FP = frumento panificabile; FB = frumento biscottiero. DS = deviazione standard.

Tabella 8.3. Analisi Annata 2025

Varietà	GRANELLA E MACINAZIONE									NIR SFARINATO INTEGRALE			SDS			NIR FARINA					ALVEOGRAFO							FARINOGRAFO					
	Durezza	Peso ettolitrico (kg/hL)	Peso 1000 semi (g)	Peso granella (g)	Peso crusca (g)	Peso cruschello (g)	Peso farina (g)	Resa macinazione (%)	Falling Number (s)	Umidità (%)	Proteine (% s.s.)	Ceneri (% s.s.)	Lettura 1 (mL)	Lettura 2 (mL)	Media (mL)	Umidità (%)	Proteine (% s.s.)	Glutine umido (%)	Assorbimento acqua (mL/100 g)	Ceneri (% s.s.)	Umidità (%)	G	P (mm)	L (mm)	P/L	W ($\times 10^{-4}$ J)	Ie (%)	Assorbimento acqua (%)	Assorbimento corretto 500 UF (%)	Sviluppo (min)	Stabilità (min)	Rammollimento 10' (UB)	Rammollimento ICC 12' (UB)
Abbondanza	S	n.d.	47,0	2700	514	700	1355	50,2	n.d.	12,1	14,4	1,77	52,0	56,0	54,0	14,3	11,7	30,8	56,7	0,44	15,2	24,1	41	117	0,35	119	43,3	56,0	56,0	3,4	4,6	77	92
Agrella 2	S	n.d.	43,0	2700	413	844	1368	50,7	n.d.	11,9	15,0	1,95	68,0	70,0	69,0	14,6	13,7	32,2	58,3	0,56	15,5	26,1	85	137	0,62	395	65,8	58,5	59,1	12,4	17,5	13	0
Lama	S	n.d.	46,0	2700	506	671	1373	50,9	n.d.	12,6	13,2	1,45	40,0	40,0	40,0	14,5	10,8	25,4	53,1	0,46	11,8	18,4	34	68	0,50	49	20,2	55,0	54,3	1,5	2,0	99	117
Lampo	S	n.d.	42,0	2700	506	646	1340	49,6	n.d.	12,6	13,5	1,70	54,0	56,0	55,0	14,6	11,9	29,8	56,6	0,50	15,6	21,9	62	97	0,64	189	53,4	53,0	54,1	1,7	9,0	38	62
Leonardo	S	n.d.	45,0	2700	475	718	1419	52,6	n.d.	12,2	13,2	1,59	50,0	51,0	50,5	14,0	10,8	30,1	54,2	0,38	15,3	22,1	45	99	0,45	107	38,0	55,0	55,0	1,5	4,1	69	75
Leonardo 44	S	n.d.	47,0	2700	476	708	1417	52,5	n.d.	11,8	14,4	1,81	50,0	56,0	53,0	14,2	11,7	30,9	55,9	0,41	16,5	23,9	52	115	0,42	134	38,4	55,3	55,1	1,7	4,4	65	72
Leone	S	n.d.	45,0	2700	436	528	1100	40,7	n.d.	12,0	13,8	1,69	44,0	48,0	46,0	14,7	11,9	30,0	55,6	0,46	11,8	23,3	33	110	0,30	76	33,9	55,0	54,6	2,0	3,5	78	91
Leone 129	S	n.d.	41,0	1500	273	363	796	53,1	n.d.	12,3	13,3	1,62	49,0	46,0	47,5	14,3	10,8	29,5	52,6	0,38	15,5	18,9	45	72	0,62	74	26,2	54,6	55,5	1,4	2,8	109	124
Leopardo	S	n.d.	45,0	2700	558	613	1368	50,7	n.d.	12,6	12,7	1,65	40,0	40,0	40,0	14,4	12,4	30,6	58,0	0,53	11,8	23,6	29	112	0,26	69	34,9	52,7	51,3	1,2	6,5	47	54
Lepre	S	n.d.	48,0	2700	498	703	1279	47,4	n.d.	12,5	12,9	1,64	42,0	41,0	41,5	13,7	10,6	28,9	54,4	0,42	11,8	14,9	42	45	0,93	49	13,9	56,0	57,1	1,7	1,9	133	161
Libellula	S	n.d.	44,0	2700	486	747	1331	49,3	n.d.	12,3	12,7	1,57	38,0	37,0	37,5	14,4	11,4	28,8	55,2	0,44	11,8	16,1	43	52	0,83	59	19,2	57,0	58,3	1,5	1,3	143	163
Liocorno	S	n.d.	45,0	2700	550	666	1370	50,7	n.d.	12,3	13,4	1,65	44,0	44,0	44,0	13,9	11,6	31,4	58,0	0,46	15,1	20,5	67	85	0,79	182	51,7	54,8	53,8	1,7	14,3	14	31
Lo 1014	M	n.d.	42,0	2700	535	831	1302	48,2	n.d.	12,3	13,7	1,88	63,0	58,0	60,5	15,3	11,9	26,5	57,3	0,55	15,6	17,4	58	61	0,95	111	38,8	56,0	56,3	1,9	7,6	46	57
Lo 12 273	S	n.d.	48,0	2700	393	978	1262	46,7	n.d.	12,0	13,6	1,95	48,0	50,0	49,0	14,5	12,4	30,4	58,0	0,54	11,8	19,3	60	75	0,80	125	38,0	59,1	60,4	2,7	4,7	64	85
Lo 17	S	n.d.	48,0	2700	412	875	1310	48,5	n.d.	12,2	14,3	1,62	46,0	46,0	46,0	14,2	12,5	30,9	58,0	0,52	14,9	17,5	55	62	0,89	103	37,5	59,5	58,8	2,0	6,4	45	45
Lo 228	S	n.d.	39,0	2700	466	830	1333	49,4	n.d.	12,4	14,0	1,60	66,0	62,0	64,0	15,2	12,9	31,7	58,1	0,47	16,2	18,1	93	66	1,41	209	48,9	59,0	58,3	3,0	18,5	28	55
Lo 3	S	n.d.	49,0	2700	464	644	1455	53,9	n.d.	12,0	13,1	1,61	25,0	22,0	23,5	14,8	11,5	26,3	54,1	0,55	16,1	16,2	40	53	0,75	52	17,1	55,0	56,4	1,3	1,2	169	188
Lo 3/58	S	n.d.	46,0	2700	448	725	1418	52,5	n.d.	12,6	12,2	1,42	34,0	34,0	34,0	14,5	10,7	23,9	51,8	0,57	11,8	17,1	38	59	0,64	64	30,5	53,9	54,3	1,5	2,1	104	115
Lo 506	S	n.d.	49,0	2700	458	936	1183	43,8	n.d.	12,1	14,1	1,76	39,0	36,0	37,5	14,4	12,9	30,3	58,4	0,53	15,2	14,8	57	44	1,30	75	19,3	63,0	64,4	2,9	2,6	128	189
Lo 510	S	n.d.	50,0	2700	370	881	1362	50,4	n.d.	12,3	12,6	1,67	62,0	60,0	61,0	14,3	11,1	29,3	57,9	0,51	15,2	17,1	74	59	1,25	135	37,6	58,0	59,6	1,6	4,7	81	98
Lo 518	S	n.d.	45,0	2700	410	865	1366	50,6	n.d.	12,0	12,2	1,73	60,0	65,0	62,5	14,4	11,2	27,2	57,9	0,48	14,9	19,0	56	73	0,77	99	28,9	58,0	59,5	2,0	3,1	75	93
Lo 523	S	n.d.	39,0	2700	390	938	1270	47,0	n.d.	12,4	13,4	1,63	52,0	46,0	49,0	14,6	12,8	31,2	58,0	0,52	11,8	19,8	77	79	0,97	187	46,7	59,0	59,8	1,8	7,8	39	43
Lo 65	S	n.d.	50,0	2700	469	777	1313	48,6	n.d.	12,1	13,3	1,70	42,0	46,0	44,0	14,2	11,2	30,2	56,9	0,41	11,8	19,1	43	74	0,58	72	25,9	59,1	58,3	2,6	2,4	75	100
Lontra	S	n.d.	45,0	2700	522	742	1243	46,0	n.d.	12,9	13,5	1,36	55,0	50,0	52,5	14,1	11,9	27,7	55,6	0,52	11,8	20,3	53	83	0,64	112	35,9	58,7	58,9	3,1	5,5	50	82
Lucciola	M	n.d.	45,0	2700	584	734	1272	47,1	n.d.	11,9	14,7	1,91	50,0	48,0	49,0	15,2	12,2	31,2	56,8	0,45	11,8	21,8	53	96	0,55	122	37,2	56,0	57,4	3,2	3,5	73	101
Lupetto	S	n.d.	45,0	2700	451	678	1458	54,0	n.d.	11,9	12,8	1,64	38,0	38,0	38,0	14,6	11,1	27,9	53,5	0,45	11,8	18,8	39	71	0,55	69	29,4	53,0	54,3	1,4	2,7	104	121
Lupo	M	n.d.	54,0	2700	496	730	1420	52,6	n.d.	12,3	13,6	1,58	31,0	33,0	32,0	15,0	11,8	30,8	57,4	0,48	15,9	17,0	21	58	0,36	31	22,6	54,6	55,8	1,6	1,5	129	150
Trebbo	M	n.d.	45,0	2700	441	830	1307	48,4	n.d.	12,2	13,8	1,72	50,0	50,0	50,0	15,1	12,5	31,6	58,2	0,49	16,2	18,8	76	71	1,07	144	33,2	59,7	60,1	3,3	6,4	40	69
Bologna (FF)	M	75,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	413	n.d.	12,5	n.d.	n.d.	n.d.	52,0	n.d.	12,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	21,8	57	96	0,56	173	n.d.	58,4	n.d.	2,8	18,4	n.d.	11
Rebelde (FF)	M	74,9	36,0	2700	501	811	1317	48,8	453	n.d.	12,4	n.d.	n.d.	n.d.	46,0	n.d.	12,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	23,0	35	107	0,33	90	n.d.	56,4	n.d.	2,2	11,8	n.d.	30
Algeri (FPS)	M	69,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	419	n.d.	11,5	n.d.	n.d.	n.d.	52,0	n.d.	11,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	20,5	59	85	0,69	172	n.d.	56,5	n.d.	2,1	15,1	n.d.	27
Solehio (FP)	M	71,0	58,0	2700	510	776	1334	49,4	380	n.d.	10,0	n.d.	n.d.	n.d.	42,0	n.d.	9,8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16,8	42	57	0,74	90	n.d.	53,0	n.d.	1,3	1,7	n.d.	66
Modern (FB)	M	66,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	407	n.d.	10,2	n.d.	n.d.	n.d.	37,0	n.d.	9,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14,8	41	44	0,93	67	n.d.	53,6	n.d.	1,5	1,9	n.d.	94
Media±DS varietà storiche (n=28)		n.d.	45,6±3,3	2657±227	464±65	746±131	1314±129	49,5±3,0	n.d.	12,2±0,3	13,5±0,7	1,67±0,14	47,6±10,5	47,5±10,7	47,5±10,5	14,5±0,4	11,8±0,8	29,5±2,1	56,3±2,0	0,48±0,05	13,9±1,9	19,5±2,9	53±17	78±24	0,72±0,30	115±72	34,5±12,0	56,6±2,5	57,0±2,8	2,4±2,1	5,5±4,5	76±40	94±46
Media±DS 17 varietà comuni		n.d.	45,6±3,5	2629±291	485±68	687±112	1309±159	49,9±3,4	n.d.	12,3±0,3	13,4±0,6	1,64±0,14	45,1±10,4	44,7±9,7	44,9±9,9	14,5±0,5	11,6±0,6	29,3±1,9	55,7±1,8	0,46±0,05	13,7±2,1	19,4±2,8	46±16	78±22	0,64±0,29	93±48	31,3±10,8	55,7±1,9	55,9±2,0	1,9±0,7	4,9±4,7	84±43	102±45
Media±DS 5 testimoni		71,5±3,6	47,0±15,6	2700±0	506±6	794±25	1326±12	49,1±0,4	414±26	n.d.	11,3±1,2	n.d.	n.d.	n.d.	45,8±6,5	n.d.	10,9±1,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	19,4±3,5	47±11	78±27	0,65±0,22	118±50	n.d.	55,6±2,2	n.d.	2,0±0,6	9,8±7,6	n.d.	46±34

n.d. = dato non disponibile. Durezza: S = soft, M = medium. Testimoni: FF = frumento di forza; FPS = frumento panificabile superiore; FP = frumento panificabile; FB = frumento biscottiero. DS = deviazione standard.