

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE E TECNOLOGIE AGRO-ALIMENTARI

CAMPUS DI CESENA

CORSO DI LAUREA IN
TECNOLOGIE ALIMENTARI

CARATTERIZZAZIONE REOLOGICA E FISICA DI DIFFERENTI CAMPIONI DI
PARMIGIANO REGGIANO

Tesi in

Tecnologie Alimentari

Relatore:

Prof. Rocculi Pietro

Correlatore:

Dott.ssa Maria Alessia Schouten

Candidato: D'Erchie Alessio

Matricola N° 922352

Anno Accademico 2021 /2022

Sessione unica

Indice

<i>Introduzione</i>	6
PARTE GENERALE	9
Capitolo 1 - Il formaggio “Parmigiano Reggiano DOP”	9
1.1 Storia	10
1.2 Il Consorzio del “Parmigiano Reggiano DOP”	11
1.2.1 Disciplinare.....	12
1.2.2 Legame con il territorio	12
1.2.3 Alimentazione delle bovine	13
1.2.4 Marchiatura.....	14
1.3 Processo di produzione	16
1.3.1 Selezione del latte	17
1.3.1.1 Caratteristiche chimico-fisiche e microbiologiche	17
1.3.2 Preparazione della cagliata	19
1.3.3 Cottura e formatura.....	19
1.3.4 Salatura	21
1.3.5 Stagionatura	21
1.3.5.1 Proteolisi	24
1.3.5.2 Lipolisi	25
1.4 Caratteristiche chimico-fisiche, nutrizionali e sensoriali	26
1.4.1 Caratteristiche chimico-fisiche	26
1.4.1.1 Umidità	26
1.4.1.2 pH.....	27
1.4.1.3 Cloruro di sodio	28
1.4.2 Valori nutrizionali.....	29
1.4.2.1 Proteine	30
1.4.2.2 Lipidi.....	32
1.4.2.3 Carboidrati	32
1.4.2.4 Vitamine.....	33
1.4.3 Caratteristiche sensoriali e morfologiche	34
1.5 Commercio e vendita del formaggio “Parmigiano Reggiano DOP”	35
1.5.1 Canali di vendita	35
1.5.2 Export	36

Capitolo 2 – Analisi di texture empirico-imitative dei formaggi	37
2.1 Principi e generalità	37
2.2 Strumenti analitici	38
2.2.1 Analisi texture profile analysis (TPA).....	39
2.2.2 Analisi three point bending (TPB).....	41
2.2.3 Analisi di taglio	42
PARTE SPERIMENTALE	45
Capitolo 3 – Materiali e metodi	45
3.1 Campioni di “Parmigiano Reggiano DOP”	45
3.2 Determinazione dell’attività dell’acqua	47
3.3 Determinazione della texture	47
3.3.1 Test di Taglio.....	48
3.3.2 Test di Texture Profile Analysis (TPA).....	49
3.3.3 Test di Three Point Bending (TPB).....	52
3.4 Analisi di texture effettuate a diverse temperature.....	54
3.5 Analisi statistica	55
Capitolo 4 – Risultati e discussione	56
4.1 Attività dell’acqua	56
4.2 Taglio	58
4.4 Texture Profile Analysis (TPA)	60
4.5 Three Point Bending (TPB)	62
4.6 Analisi di texture a diverse temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C	63
4.6.1 Taglio a diverse temperature	63
4.6.2 Texture Profile Analysis (TPA) a diverse temperature	64
4.6.3 Three Point Bending (TPB) a diverse temperature.....	67
Capitolo 5 – Conclusioni	70
Bibliografia	71
Sitografia	73

Introduzione

Il formaggio rappresenta il più antico e valido metodo conosciuto dall'uomo per concentrare e preservare nel tempo il valore nutritivo del latte. Una serie complessa di operazioni che, dal latte fresco o pastorizzato, comprendono la formazione di una cagliata, la sua maturazione e lo spurgo del siero, cioè della parte acquosa del latte, portano alla formazione di un nuovo prodotto, il formaggio. Esistono molti tipi di formaggi ma ciò che li contraddistingue maggiormente è il loro contenuto in acqua, con la quale possiamo effettuare una prima classificazione: i formaggi a pasta molle con un contenuto in acqua che supera il 45%, i formaggi a pasta semidura quando il contenuto in acqua è compreso tra il 35 e il 45% e infine i formaggi a pasta dura il cui contenuto di acqua è inferiore al 35% (Corradini, 1995). In Italia, tra i formaggi freschi a pasta molle e stagionati a pasta dura, esistono oltre 300 tipologie riconosciute con Denominazione d'Origine Protetta (DOP) e Indicazione Geografica Protetta (IGP). I formaggi Grana Padano e Parmigiano Reggiano sono due dei più importanti prodotti lattiero-caseari a Denominazione di Origine Protetta (DOP) del panorama agroalimentare italiano. La loro produzione ha un enorme impatto sul mercato perché sono tra i prodotti agroalimentari italiani più esportati nel mondo (Lovarelli et al., 2018).

Tra i formaggi a pasta dura DOP rientra appunto il Parmigiano Reggiano, un formaggio dalle tradizioni antichissime, che viene prodotto ancora secondo le specifiche di una volta.

Questo formaggio è attualmente protetto da un disciplinare di produzione e da un ente che ne tutela l'originalità e l'autenticità rappresentato dal Consorzio del formaggio "Parmigiano Reggiano". L'obiettivo del consorzio è quello di tutelare, promuovere e agevolare il commercio e il consumo del Parmigiano Reggiano oltre che a essere il principale punto di riferimento per tutti i consorziati che ne fanno parte. Il disciplinare di produzione del Parmigiano Reggiano è un documento riconosciuto dall'Unione Europea che è stato introdotto per la prima volta nel 1957 dal CFPR e contiene tutte le norme e i regolamenti specifici per la produzione di questo formaggio. Quando parliamo di formaggi è necessario soffermarsi su un parametro importante; il quale è in grado di rappresentare dal punto di vista sensoriale la qualità di un prodotto oltre che influire sulle scelte di un consumatore, ovvero le caratteristiche strutturali e di texture.

La proprietà strutturali di un formaggio e le analisi che vengono effettuate per determinarle sono in grado di fornire informazioni sulle modificazioni che intervengono quando quest'ultimo viene consumato, comprendendo quasi tutti i sensi di cui un essere umano è dotato.

A questo proposito divengono rilevanti al fine della sperimentazione condotta gli aspetti reologici e di texture, i quali influenzano la percezione degli alimenti; il loro studio può fornire indicazioni sugli

aspetti sensoriali e contribuire alla predizione dell'accettabilità dei prodotti destinati al consumo. Grazie a ciò è possibile analizzare le proprietà meccaniche e strutturali di un prodotto come in questo caso il formaggio, dove il materiale esibisce alcune delle caratteristiche di un solido e contemporaneamente alcune delle caratteristiche di un liquido. Il formaggio quindi si inserisce perfettamente in questa categoria, come infatti fanno quasi tutti i cibi destinati ad essere consumati (Prentice et al., 1993).

Lo scopo di questa sperimentazione è stata quella di valutare il profilo di texture di differenti campioni di Parmigiano Reggiano al fine di comprenderne il comportamento strutturale quando questi ultimi vengono sottoposti a delle forze e delle sollecitazioni esterne come avviene per la masticazione.

Sono stati impiegati 3 principali metodi per valutare il profilo strutturale dei campioni, tra cui il TPA (il texture profile analysis), il TPB (three point bending test) ed il test di taglio.

PARTE GENERALE

Capitolo 1 - Il formaggio “Parmigiano Reggiano DOP”

Il Parmigiano Reggiano è un formaggio a Denominazione d’Origine Protetta (DOP), prodotto nei territori delle provincie di Parma, Modena, Reggio-Emilia e Bologna a sinistra del fiume Reno e Mantova a destra del Po. È un formaggio a pasta dura, cotta, granulosa a lunga e naturale maturazione, prodotto con latte crudo, parzialmente scremato, proveniente da vacche la cui alimentazione è costituita prevalentemente da foraggi della zona d’origine. La trasformazione del latte in Parmigiano Reggiano è ancora basata su una tecnologia artigianale legata all’esperienza empirica dei casari e dell’osservanza degli usi e consuetudini secolari (Garini et al., 2007). Sia la qualità dei suoi ingredienti che la modalità per la sua preparazione sono rimaste immutate nel tempo fino ai giorni nostri, tanto da rendere questa specialità unica e meritare la denominazione DOP che ne tutela le caratteristiche (Cozzi et al., 2019). Secondo la definizione dettata dal Codex Alimentarius il formaggio è *“il prodotto fresco o stagionato, solido o semisolido ottenuto per coagulazione di latte, latte scremato, latte parzialmente scremato, crema, crema di siero o di latticello, soli o in combinazione tra loro, e per cessione parziale del siero che si separa da detta coagulazione”* (Corradini, 1995). Il Parmigiano Reggiano è uno dei prodotti tipici più conosciuti e imitati al mondo; un formaggio che gode di un’ottima reputazione, profondamente radicata nella storia. Le caratteristiche organolettiche e nutrizionali del Parmigiano Reggiano sono il prodotto di ben precise scelte produttive, definitesi nei secoli e sostanzialmente stabili da almeno 70 anni da quando, nel 1934, è stato istituito il Consorzio di Tutela. Il ruolo del Consorzio Parmigiano Reggiano DOP, definito prima dalla normativa nazionale e successivamente da quella comunitaria, è stato ed è tuttora quello di stabilire il Disciplinare di produzione, il quale diviene vincolante per ogni produttore, oltre a fornire garanzie sul rispetto del disciplinare stesso (MiPAAF, 2018). In *Figura 1* è riportata l’area geografica di produzione del Parmigiano Reggiano secondo il disciplinare di produzione.



Figura 1. Area di produzione del “Parmigiano Reggiano DOP” (Cozzi et al., 2019).

1.1 Storia

Le origini del Parmigiano Reggiano (originamente denominato “*caseus parmensis*”) vanno collocate, orientativamente, nel corso del XII secolo, ovvero in pieno Medioevo e secondo alcune fonti potrebbero essere addirittura antecedenti. I primi produttori di questo formaggio furono i monaci Benedettini e Cistercensi dei monasteri situati nelle pianure intorno alle città di Parma e Reggio Emilia. La produzione casearia si sviluppò grazie al latte vaccino proveniente dai pascoli locali a cui veniva aggiunto il sale proveniente dalle saline di Salsomaggiore; consentendo ai monaci di ottenere un alimento appetitoso e nutriente che, allo stesso tempo, aveva il prezioso vantaggio di poter essere conservato a lungo, una caratteristica di notevole importanza, soprattutto se collocata in quel periodo storico (Cozzi et al., 2019). Col passare degli anni, i monaci persero l’esclusività nella produzione di questo formaggio, venendo dapprima affiancati dalle ricche casate aristocratiche, successivamente seguiti da semplici cittadini dalla forte vocazione artigianale. Il *caseus parmensis* (Figura 2) riuscì così a riscuotere notevole successo grazie alla sua facilità di trasporto, che consentì la sua commercializzazione in Italia, e progressivamente, nel resto d’Europa (Bartolini, 1999). Questo formaggio divenne quindi un prodotto popolare che riscosse un grande successo, come riportato dalle testimonianze dell’epoca. Non è dunque un caso che nel 1612, per la prima volta, le principali caratteristiche di questo prodotto vennero certificate in un documento voluto dal Duca Ranuccio I Farnese, deciso a tutelare uno dei prodotti di punta del suo territorio. Il desiderio di tutela innescato dal Duca di Parma crebbe progressivamente fino a culminare nella fondazione, avvenuta nel 1934, del Consorzio di tutela del Parmigiano Reggiano.

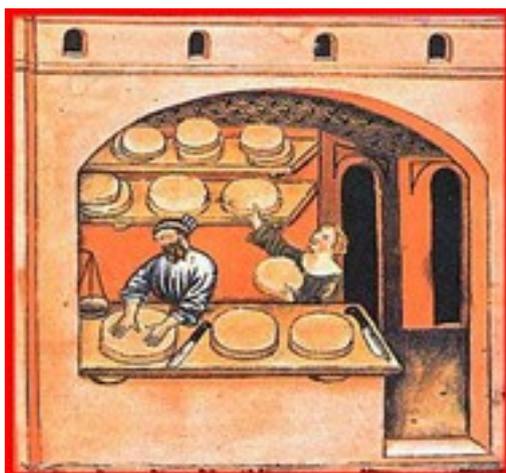


Figura 2. Illustrazione storica delle prime forme di Parmigiano Reggiano commercializzate (Bartolini, 1999).

1.2 Il Consorzio del “Parmigiano Reggiano DOP”

Nel 1934 nasce il “Consorzio Volontario Interprovinciale Grana Tipico”, oggi conosciuto come Consorzio del Formaggio “Parmigiano Reggiano DOP” (CFPR), grazie ai rappresentanti dei caseifici di Parma, Modena e Mantova destra Po che si accordarono sulla necessità di approvare un marchio di origine per il loro formaggio (Franchini, 2019). Nel corso degli anni il Consorzio agì in protezione del prodotto, adottando provvedimenti in sua tutela, tra cui la marchiatura d’origine con la tipica scritta a puntini Parmigiano Reggiano sul fianco della forma. Nel 1992 viene approvato il Regolamento CEE 2081/1992 sulle Denominazioni d’Origine Protette e nel 1996 viene riconosciuta la DOP europea del “Parmigiano Reggiano” (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2022). Grazie alla DOP riconosciuta dall’Unione Europea, le modalità di produzione divengono a norma di legge obbligatorie e vincolanti per chiunque decida di produrre questo tipo di formaggio, tutelando i produttori autorizzati e garantendo la massima trasparenza e indipendenza. Il ruolo e i compiti del Consorzio erano e sono la difesa e la tutela della DOP, l’agevolazione del commercio e del consumo, la promozione delle iniziative volte a salvaguardare tipicità e caratteristiche peculiari del prodotto a beneficio collettivo dei consorziati (Giacomini et al., 2012).

1.2.1 Disciplinare

In seguito alla nascita del Consorzio e il riconoscimento della DOP a livello europeo del Parmigiano Reggiano, viene introdotto il disciplinare di produzione; un documento che contiene tutte le regole e le norme cogenti che devono essere rispettate, affinché un formaggio possa essere legalmente considerato e venduto come “Parmigiano Reggiano DOP” (Cozzi et al., 2019). Il ruolo del disciplinare oltre a dare garanzie sul prodotto finito è quella di assicurare la genuinità e la tipicità del prodotto. In dettaglio, il documento racchiude una serie di criteri e principi che vincolano ogni singolo produttore in possesso di licenza rilasciata dal consorzio a rispettare le norme contenute all'interno del regolamento DOP. Le norme riguardano l'area di produzione e il metodo di trasformazione del latte in formaggio dall'alimentazione delle bovine, alla provenienza del latte e alle tecniche di produzione, racchiudendo il tutto in tre domini principali definiti nel 1957 dal CFPR:

1. Regolamento di alimentazione delle bovine;
2. Standard di produzione del formaggio Parmigiano Reggiano DOP;
3. Regolamento di marchiatura delle forme (Cozzi et al., 2019).

1.2.2 Legame con il territorio

La zona di produzione del Parmigiano Reggiano DOP definita dal disciplinare comprende le province di Parma, Reggio Emilia, Modena e parti delle province di Mantova e Bologna comprese tra il Po e il Reno. Le caratteristiche del suolo della zona di produzione, unita alle condizioni climatiche, influiscono direttamente sulla composizione della microflora batterica naturale e sulle caratteristiche fermentative specifiche del formaggio. Le caratteristiche del latte, con le sue particolari proprietà fisiche, chimiche e microbiologiche, dipendono notevolmente dall'alimentazione delle bovine da latte, a base di foraggi della zona, mentre è severamente vietato l'uso di insilati. Le condizioni pedoclimatiche locali, inoltre, aiutano il formaggio ad acquisire le caratteristiche tipiche del Parmigiano Reggiano DOP attraverso particolari processi enzimatici totalmente naturali e nel rispetto delle norme vigenti. L'importanza storica del formaggio per l'economia locale è un altro importante elemento che lega il prodotto al territorio poiché il processo produttivo oggi utilizzato, trae origine tuttora dalle tradizionali tecniche casearie consolidate nei secoli in questa zona geografica (Commissione Europea, 2006). La biodiversità che rende unico il Parmigiano Reggiano è da ricondurre principalmente alla sua zona di origine; un connubio di fattori ambientali e territoriali che

dalle pianure di prati alle colline fino ad arrivare alle montagne modellano e garantiscono al formaggio delle caratteristiche uniche e peculiari riconosciute a livello mondiale (Iotti, 1991). All'interno del territorio, l'organizzazione della filiera del Parmigiano Reggiano viene considerata da molti come un equilibrio funzionale tra i diversi attori, i quali interagendo l'un l'altro lungo la catena del valore sono capaci di rispondere al meglio alle esigenze dell'innovazione tecnologica e delle politiche agricole (Cozzi et al., 2019).

1.2.3 Alimentazione delle bovine

Il disciplinare di produzione stabilisce le modalità per l'alimentazione delle bovine destinate a produrre latte per la trasformazione del "Parmigiano Reggiano DOP". L'alimentazione diviene ai fini dell'intero processo produttivo una fase delicata, poiché la nutrizione delle bovine, garantisce la qualità del latte impiegato alla caseificazione e l'adempimento alle norme obbligatorie prescritte dal regolamento di produzione del Parmigiano Reggiano DOP (Cozzi et al., 2019). L'ingrediente principale della razione giornaliera di mangime è il foraggio locale. Almeno il 50% della sostanza secca del foraggio deve essere costituita da fieno e almeno il 75% della sostanza secca foraggera deve provenire dalla zona di produzione ubicata nella zona geografica delimitata dal regolamento (Commissione Europea, 2018). Non devono essere somministrati alle bovine da latte alimenti che possono trasmettere aromi e sapori anomali al latte e alterarne le caratteristiche tecnologiche, alimenti fonte di contaminazione e in cattivo stato di conservazione (Disciplinare di produzione del Parmigiano Reggiano DOP, 2006, 2008, 2010). A differenza del Grana Padano DOP, in cui per l'alimentazione delle bovine possono essere utilizzati insilati e sostanze come i folati, nella produzione del Parmigiano Reggiano l'alimentazione delle bovine avviene esclusivamente mediante la somministrazione di mangime secco e fieno di prato verde provenienti in prevalenza dal territorio del comprensorio. Dal confronto tra le aziende che producono latte destinato rispettivamente alla produzione di Parmigiano Reggiano e Grana Padano, emerge come la bassa produttività del primo possa essere ricondotta al divieto di utilizzo di insilati nella razione alimentare, comportando una diminuzione del latte prodotto rispetto a quello che si ottiene dalle bovine del comprensorio del Grana Padano (Franchini, 2019).

1.2.4 Marchiatura

L'incarico dell'apposizione dei marchi e contrassegni del formaggio Parmigiano Reggiano DOP è ufficialmente affidato al Consorzio di tutela; il quale ha il ruolo di salvaguardare il marchio contro l'appropriazione illecita e la frode, garantendo al formaggio una determinata qualità di stagionatura (Cozzi et al., 2019). Il Parmigiano Reggiano DOP deve riportare sulla forma i contrassegni nella loro integrità, atti a identificare e distinguere il prodotto. I contrassegni si distinguono tra marchi d'origine Figura 3, apposti direttamente dal caseificio alla nascita del formaggio, con la funzione di individuare l'origine del prodotto e marchi di selezione Figura 3 (impresso in seguito all'espertizzazione della forma), con il compito di attestare la verificata corrispondenza del prodotto, relativo ai dettami e alle prescrizioni del disciplinare di produzione, legittimando l'utilizzo della Denominazione di Origine Protetta e garantendo la qualità del prodotto (Franchini, 2019). I contrassegni d'origine vengono impressi nelle prime ore di vita del prodotto grazie all'utilizzo della fascera marchiante lungo tutto lo scalzo della forma che riporta le seguenti informazioni (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2022):

- Scritta a puntini Parmigiano Reggiano;
- Scritte DOP e Consorzio di tutela;
- Numero di matricola del caseificio (in 3 posizioni diverse);
- Mese e anno di produzione (in 3 posizioni diverse);
- Marchio di identificazione (requisito sanitario che identifica lo stabilimento di produzione).

Oltre a queste informazioni viene applicata una placca di caseina su una delle superfici piatte della forma riportante un codice alfanumerico dando la possibilità di risalire al giorno in cui la forma è nata. Il marchio di selezione invece viene impresso a fuoco al compimento del dodicesimo mese di stagionatura, sulle forme che superano l'espertizzazione a cui vengono sottoposti i formaggi. L'esame di selezione identifica tre categorie di formaggio (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2022):

- Prima categoria: (Parmigiano Reggiano), il formaggio che risponde a tutte le caratteristiche del disciplinare;
- Seconda categoria: (Parmigiano Reggiano Mezzano), il formaggio rappresenta difetti di lieve entità nella struttura della pasta o crosta, ma senza alterazioni delle caratteristiche organolettiche;

- Terza categoria: (Scarto o sbiancato), il formaggio rappresenta difetti troppo rilevanti non rientrando nei limiti del disciplinare del Parmigiano Reggiano, i marchi apposti vengono eliminati tramite fresatura della crosta non avendo più alcun riferimento alla DOP.

Oltre a questi tipi di contrassegni ne esistono altri che garantiscono al consumatore caratteristiche aggiuntive e peculiari; tra questi rientrano:

- Marchio “Prodotto di montagna” Figura
- Marchio “Export” Figura
- Marchio “Premium.



Figura 3. (a sinistra) Marchio di selezione che attesta la conformità ai regolamenti delle forme di “Parmigiano Reggiano DOP”; (a destra) Marchio d’origine apposto dai caseifici alla nascita del formaggio “Parmigiano Reggiano DOP” (MiPAAF, 2018).

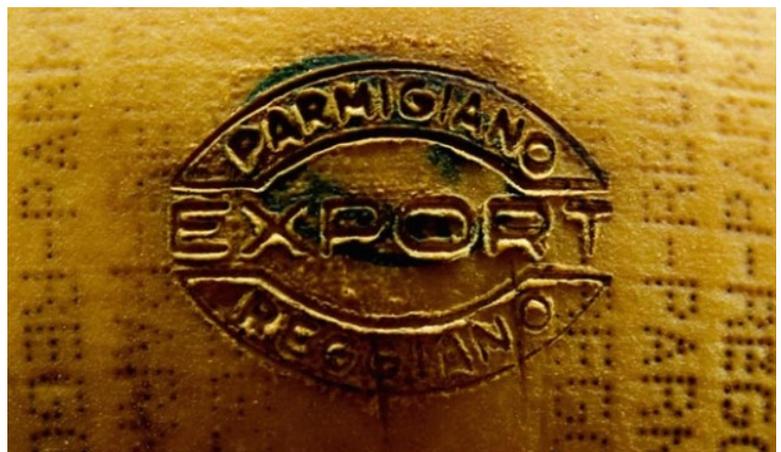


Figura 4 (a sinistra) Marchio Prodotto di montagna, (a destra) marchio Export (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2022).

1.3 Processo di produzione

Il processo produttivo, riassunto in *Figura 5*, è prevalentemente artigianale e divengono importanti le competenze professionali del casaro, i quali garantiscono la corretta esecuzione delle varie fasi di processo e di lavorazione. Nella lavorazione del latte per il Parmigiano Reggiano DOP, l'elemento umano è critico ed esercita una forte influenza sulla qualità del prodotto finale. Il Parmigiano Reggiano è un prodotto appartenente a quel gruppo di prodotti caseari che, a differenza della maggior parte dei formaggi, utilizzano il latte crudo nella loro fabbricazione (de Roest, 2000).

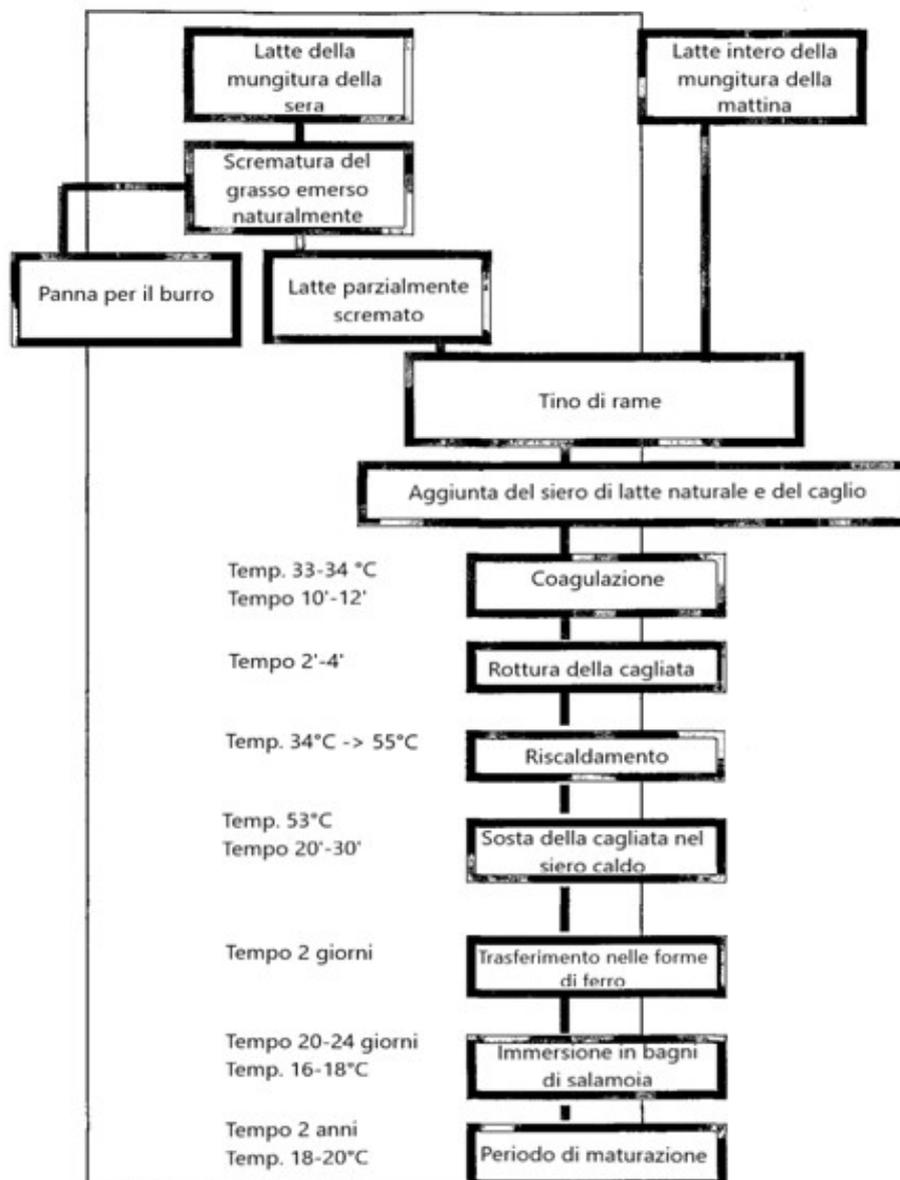


Figura 5 Processo produttivo del formaggio “Parmigiano Reggiano DOP” (adattato da de Roest, 2000).

1.3.1 Selezione del latte

Il latte è una materia prima estremamente variabile, soprattutto nella produzione di formaggi a latte crudo (Beresford et al., 2001). Dalla sua composizione chimica e microbiologica dipende l'intero processo produttivo del formaggio Parmigiano Reggiano. I produttori utilizzano le loro competenze tecniche per combinare i fattori relativi all'ambiente: il tipo di mangime, la razza delle bovine, il sistema di mungitura, la fase di lattazione, il sistema di stalla e il pedoclima; il tutto per favorire lo sviluppo di una microflora che sia capace di svilupparsi e dare origine al Parmigiano Reggiano DOP (de Roest, 2000). Le razze bovine che vengono prevalentemente impiegate per la mungitura del latte destinato alla produzione del Parmigiano Reggiano sono (Iotti, 1991; Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2022):

- Frisone Italiana: una delle razze bovine più impiegate dagli allevatori che producono latte per il Parmigiano Reggiano;
- Bruna Italiana;
- Rossa Reggiana;
- Bianca Modenese.

1.3.1.1 Caratteristiche chimico-fisiche e microbiologiche

Il latte che viene utilizzato per la produzione del Parmigiano Reggiano DOP ha delle qualità specifiche e caratteristiche che lo rendono adeguato alla caseificazione di questo formaggio. Nella produzione di formaggi a latte crudo, la composizione chimica del latte e le sue caratteristiche microbiche possono avere effetti significativi sulla resa (Le Maréchal et al., 2011; Summer et al., 2015) e sulla qualità sensoriale (Vianna et al., 2008). Nella produzione del Parmigiano Reggiano, la resa del prodotto è direttamente correlata al contenuto di grassi e proteine del latte (Formaggioni et al., 2015) ed è influenzata anche dal contenuto di cellule somatiche (Le Maréchal et al., 2011; Summer et al., 2015). Inoltre, un'elevata carica batterica totale e/o la presenza di coliformi e spore di Clostridi possono causare difetti strutturali, di colore e sensoriali nel formaggio (Beresford et al., 2001). Nella *Tabella 1* è riportata la composizione chimica del latte con i relativi livelli minimi e massimi osservati per la produzione di Parmigiano Reggiano. Il latte crudo contiene una notevole quantità di microorganismi di forme e dimensioni variabili che reagiscono con le sostanze solide presenti nel latte per trasformarle in diversi composti (de Roest, 2000). Questi microorganismi non sono in grado

di sintetizzare le sostanze inorganiche e quindi, per sopravvivere e moltiplicarsi devono interagire con le sostanze organiche presenti. Data l'enorme varietà di microorganismi, per semplicità è possibile suddividerli in 2 grandi gruppi (de Roest, 2000):

1. Microorganismi positivi per la caseificazione che comprendono i lattococchi, i lattobacilli e una serie di acidi proteolitici che fanno parte della microflora originaria del latte. Durante il processo di caseificazione questi microorganismi scindono il lattosio, il principale zucchero del latte, per poi produrre acido lattico, conferendo al prodotto i giusti livelli di acidità di fermentazione prima dell'inizio della trasformazione.
2. Microorganismi negativi, anche definiti "anti-caseari", che comprendono i butirrici ed i proteolitici. Questa tipologia ha un effetto negativo nella produzione del Parmigiano Reggiano; infatti, i microbi butirrici scindono il lattosio del latte, producendo acido butirrico e grandi quantità di gas, soprattutto idrogeno; mentre i proteolitici scindono le sostanze azotate trasformandole in aminoacidi e ammoniaca. Questi microorganismi provengono normalmente da fonti esterne al latte stesso, riproducendosi in particolare nelle aree non adeguatamente pulite e sanificate, sviluppandosi facilmente su alimenti mal conservati. Un fattore che accomuna questi organismi nocivi è il fatto di essere spesso aerobi e di richiedere ossigeno per portare a termine la fermentazione; inoltre, i microorganismi butirrici sono protetti da una capsula, il quale fornisce loro un'elevata resistenza al calore.

Tabella 1. Composizione chimica percentuale del latte impiegato per la produzione del formaggio Parmigiano Reggiano DOP (de Roest, 2000).

	Medio (%)	Minimo (%)	Massimo (%)
Acqua	88.0	87.0	89.0
Lattosio	4.5	4.3	5.2
Lipidi	3.3	3.0	3.8
Caseine	2.5	2.0	2.7
Proteine del siero del latte	0.5	0.40	0.60
Azoto non proteico	0.1	0.13	0.18
Sali minerali	0.9	0.85	0.95

1.3.2 Preparazione della cagliata

Il Parmigiano Reggiano DOP è ottenuto dal latte di due mungiture, una della sera e una della mattina. Così come in passato avveniva, il latte della sera viene parzialmente scremato grazie all'affioramento naturale della panna che avviene in vasche d'acciaio, mentre il latte del mattino è miscelato con quello parzialmente scremato della sera precedente. Al latte si aggiunge il siero-innesto o il siero fermento, una coltura naturale di fermenti lattici, ottenuta dal siero residuo proveniente dalle lavorazioni del giorno precedente. Successivamente, alla temperatura di circa 33-35 °C, viene aggiunto nelle caldaie tronco coniche di rame *Figura 6* il caglio di vitello; in questo modo nella caldaia, mantenuta a temperatura costante, si forma nell'arco di circa 10-12 minuti una massa gelatinosa sempre più consistente: la *cagliata* (de Roest, 2000; Franceschi et al., 2019; Consorzio del parmigiano Reggiano, 2022).



Figura 6. Tipica caldaia in rame utilizzata per la cottura della cagliata (parmigiano-terreale, 2022).

1.3.3 Cottura e formatura

Quando la massa caseosa raggiunge il giusto grado di consistenza, si passa alla fase di spinatura; con lo scopo di rompere la cagliata in tanti piccoli granuli di circa 2-4 mm ciascuno. Al termine della spinatura, si procede con la cottura, nella quale la temperatura è condotta in modo costante e graduale

da 33-35 °C a 55 °C in un intervallo di tempo di 10-15 minuti. In queste fasi emerge in modo evidente il ruolo del casaro, una figura centrale, che con l'esperienza accumulata nel corso degli anni è capace di gestire accuratamente tutti passaggi (de Roest, 2000). Terminata la fase di cottura si lasciano sedimentare i granuli sotto il siero sul fondo della caldaia di cottura per 45-60 minuti al fine di ottenere una massa compatta. Successivamente, si procede con la gemellatura *Figura 7*, un processo nella quale la massa ottenuta viene sollevata delicatamente dal fondo della caldaia e avvolta in una tela di lino o canapa. La cagliata appesa sopra la caldaia di rame viene in seguito tagliata a metà in modo da ottenere due forme il più possibile uguali e trasferite in appositi stampi per la formatura, fase che dura circa 2-3 giorni, con l'acidificazione della cagliata al primo giorno. In serata la forma, ancora morbida, viene avvolta con una fascia marchiante dentellata che, oltre a scolpire la tipica scritta Parmigiano Reggiano a puntini, incide anche anno e mese di produzione insieme al numero di matricola del caseificio che l'ha prodotta, identificando l'origine del prodotto. È prevista anche l'apposizione di una placca di caseina che riporta un codice identificativo univoco, che consente la rintracciabilità delle forme come precedentemente spiegato nel capitolo “1.2.4 Marchiatura” (de Roest, 2000; Franceschi et al., 2019; Consorzio del parmigiano Reggiano, 2022).



Figura 7. Fase di formatura (roncoscaglia, 2022).

1.3.4 Salatura

Una volta formato, il formaggio Parmigiano Reggiano viene sottoposto ad un processo di salatura. Questa fase avviene per immersione della forma in una soluzione satura di cloruro di sodio per un periodo di 15-20 giorni, ad una temperatura controllata di 16-18 °C in modo tale che il sale riesca a diffondersi alla giusta velocità in tutto il formaggio (de Roest, 2000 ; Franceschi P. et al., 2019; Consorzio del parmigiano Reggiano, 2022). La salatura *Figura 8* viene eseguita all'interno di vasche apposite con una salinità del 5% e giornalmente le forme vengono capovolte all'interno della vasca in modo da favorire lo scambio del sale all'interno del formaggio.



Figura 8. Salatura delle forme di Parmigiano Reggiano all'interno delle vasche di salamoia (parmigiano-terrealte, 2022).

1.3.5 Stagionatura

La stagionatura avviene all'interno di magazzini di maturazione *Figura 9*, una fase che si protrae per un minimo di 12 mesi a una temperatura compresa tra i 18 e i 20 °C. Durante questo periodo, il formaggio subisce una serie di cambiamenti chimici, fisici e microbiologici dovuti principalmente dall'attività degli enzimi dei batteri lattici che donano al prodotto finito una serie di particolarità apprezzate quali aromi, profumi e alta digeribilità che caratterizzano il Parmigiano Reggiano DOP

(de Roest, 2000; Franceschi et al., 2019; Consorzio del parmigiano Reggiano, 2022). Durante la permanenza del formaggio nei magazzini di maturazione vengono eseguiti dei rivoltamenti periodici seguiti da pulizie (spazzolature e raschiature) della parte superficiale della forma per correggere ed eliminare eventuali difetti estetici (de Roest, 2000).

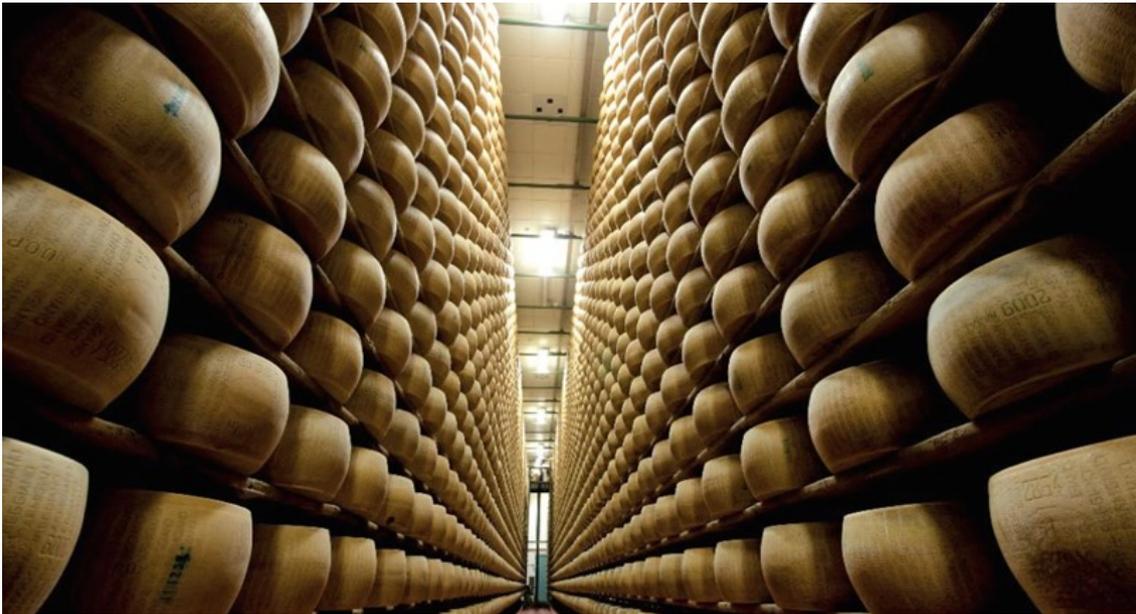


Figura 9. Fase di maturazione e stagionatura all'interno di magazzini controllati (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2022).

La maturazione è un intricato processo post salagione e coinvolge trasformazioni biochimiche complesse che consentono al formaggio di ottenere un profilo aromatico e gustativo particolare. I fattori microbici, enzimatici e chimici sono i principali attori nello sviluppo delle caratteristiche del formaggio, tra cui le proteinasi del latte, il caglio, nonché gli enzimi proteolitici e peptidolitici della microflora primaria e secondaria, che degradano le proteine del latte in un profilo amminoacidico ben definito e caratteristico (Scolari et al., 2005). La trasformazione catabolica dei composti proteici produce l'aroma finale, rendendo la proteolisi un prerequisito essenziale per lo sviluppo tipico del sapore (McSweeney et al., 2000). Sin dalle prime fasi di produzione del Parmigiano Reggiano è possibile identificare la presenza di una variegata microflora, riportata nella *Tabella 2*, costituita essenzialmente da lattobacilli, lattococchi, streptococchi, enterococchi enterobatteri e micrococchi (Coppola et al., 2000).

Tabella 2. Conta microbica effettuata durante la caseificazione e la stagionatura del Parmigiano Reggiano (Coppola et al., 2000).

	Unità formanti colonie Log · mL ⁻¹				Unità formanti colonie Log · g ⁻¹								
	Stater di siero di latte naturale	Latte	Siero di latte dopo la cottura	Caglio	Formaggio								
					24 h	5 gg	8 gg	15 gg	30 gg	60 gg	90 gg	120 gg	150 gg
Batteri lattici a 45°C	8.34 (0.85)	3.26 (0.24)	6.61 (0.95)	7.11 (0.46)	7.01 (0.22)	7.45 (0.78)	7.28 (0.79)	6.92 (0.74)	6.88 (0.78)	7.23 (1.17)	7.46 (0.56)	7.23 (0.81)	6.84 (0.55)
Batteri lattici a 22°C	3.42 (0.33)	4.78 (0.45)	4.44 (1.03)	4.3 (0.67)	5.26 (0.87)	5.35 (0.56)	5.86 (0.88)	6.48 (1.01)	7.32 (0.76)	7.46 (0.66)	7.5 (0.89)	7.74 (0.69)	7.52 (0.74)
Streptococchi termofili	<2	2.9 (0.98)	4.4 (0.67)	2.3 (0.78)	<2	<2	<2	<2	<2	ND	ND	ND	ND
Lattococchi	ND	4.5 (0.67)	3.49 (1.04)	3.6 (0.77)	4.4 (1.22)	3.2 (0.99)	3.1 (0.65)	2.14 (1.23)	<2	<2	ND	ND	ND
Enterococchi	ND	2.82 (0.87)	2.46 (0.67)	3.2 (1.3)	3.51 (0.78)	3.45 (0.88)	3.92 (0.55)	4.02 (0.61)	4.17 (0.66)	3.49 (0.88)	2.99 (0.76)	2.18 (0.45)	2.00 (1.0)
<i>Enterobacteriaceae</i>	ND	2.65 (0.59)	2.56 (0.68)	1.3 (0.4)	A	A	A	A	A	ND	ND	ND	ND
Coliformi	ND	2.06 (0.45)	1.95 (0.55)	1.2 (0.23)	A	A	A	A	A	ND	ND	ND	ND
<i>Micrococcaceae</i>	ND	4.28 (0.87)	3.56 (0.61)	3.1 (0.89)	3.26 (1.01)	3.15 (0.67)	3.1 (0.76)	3.3 (1.11)	3.26 (0.99)	2.70 (0.77)	2.4 (0.65)	2.1 (1.02)	1.8 (0.88)

ND: non determinato; A: assente in 1 g o mL; media ± deviazione standard

La presenza di questi microorganismi è dovuta principalmente dalla complessità microbiologica e qualitativa del latte crudo, il quale risulta un ottimo substrato di crescita per gli stessi, influenzando i processi di caseificazione del Parmigiano Reggiano. In particolare, lo studio di Jimeno et al. (1995) ha identificato la complessità del siero di latte usato come starter naturale, il quale è fonte di ceppi eterofermentativi facoltativi attribuibili al *Lactobacillus Rhamnosus*, definendo inoltre il latte crudo come una complessa fonte di microorganismi quali lattobacilli, lattococchi e streptococchi. Uno studio di Coppola et al. (2000) si è soffermato sulla crescita dei batteri lattici durante i primi mesi di stagionatura; è stato evidenziato come il loro sviluppo sia correlato alla graduale diminuzione della concentrazione di acido citrico, dimostrando che la crescita dei batteri lattici sia principalmente legata alla loro capacità di utilizzare i citrati come unica fonte di energia. Lo stesso studio ha inoltre dimostrato la correlazione tra la diminuzione della concentrazione dell'acido citrico rispetto all'attività dell'acqua presente nel prodotto durante la maturazione, come mostrato nella Figura 10.

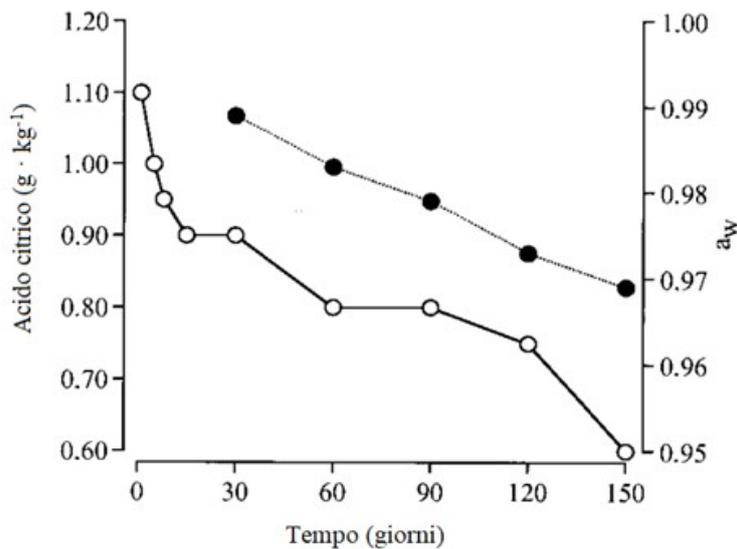


Figura 10. Variazione del contenuto di acido citrico (●) e attività dell'acqua (○) durante la maturazione del Parmigiano Reggiano (Coppola et al., 2000).

In genere, il tipo di microflora detiene un ruolo chiave durante l'intero periodo d'invecchiamento, grazie al rilascio degli enzimi causato dall'autolisi cellulare dei batteri lattici (Coppola et al., 2000). La complessa composizione della microflora lattica contenuta nel latte crudo evidenzia come i processi di maturazione del Parmigiano dipendano dalla quantità e dalla qualità dei microorganismi coinvolti e dai processi enzimatici che ne seguono (Coppola et al., 2000).

1.3.5.1 Proteolisi

La proteolisi rappresenta un fenomeno che consiste nella scissione idrolitica di una proteina ad opera di enzimi. Questo processo risulta essere di grande importanza in quanto, in grado di caratterizzare l'intero processo di stagionatura del formaggio. Il complesso biochimismo proteolitico è governato da un sistema enzimatico costituito da entità in parte native e in parte esogene che coinvolge tutti gli enzimi specifici del latte e del caglio e della microflora inquinante del latte (Malacarne et al., 2006). La degradazione proteolitica non sempre procede in modo regolare dalle unità ad elevato peso molecolare alle sostanze con basso peso molecolare. La prima tappa è rappresentata dalla degradazione delle singole caseine ad opera delle endopeptidasi con formazione di unità più piccole; le quali vengono successivamente modificate dalle esopeptidasi con la formazione di peptidi a medio e basso peso molecolare. Secondo lo studio effettuato da Malacarne et al. (2006) la proteolisi della frazione caseinica è particolarmente intensa nel corso dei primi mesi di stagionatura, mentre si attenua

sensibilmente durante le fasi intermedie e soprattutto in quelle finali del ciclo di stagionatura. Altrettanto intensa risulta la degradazione proteolitica dei prodotti intermedi e la liberazione di aminoacidi e peptidi a basso peso molecolare, i quali tendono ad accumularsi durante l'intera fase di stagionatura del formaggio (Malacarne et al., 2006).

1.3.5.2 Lipolisi

Gli agenti della lipolisi sono rappresentati essenzialmente dalle lipasi. Nel corso della stagionatura del Parmigiano Reggiano gli enzimi lipolitici liberano una quantità più o meno importante di acidi grassi, dalla cui degradazione ossidativa si possono formare composti carbonilici a basso peso molecolare con peculiari caratteristiche aromatiche specie se provenienti da acidi grassi insaturi. Il grasso attraverso i prodotti diretti e derivati dalla lipolisi concorre alla formazione delle caratteristiche organolettiche e dell'aroma nei formaggi a media e lunga stagionatura come nel caso del Parmigiano. In *Figura 11* viene illustrato l'andamento della lipolisi nel formaggio Parmigiano Reggiano che determina la liberazione degli acidi grassi, mentre in *Figura 12* viene indicata la composizione degli acidi grassi liberi che si formano durante il processo di idrolisi dei trigliceridi del Parmigiano Reggiano raggruppati in base al numero di atomi carbonio.

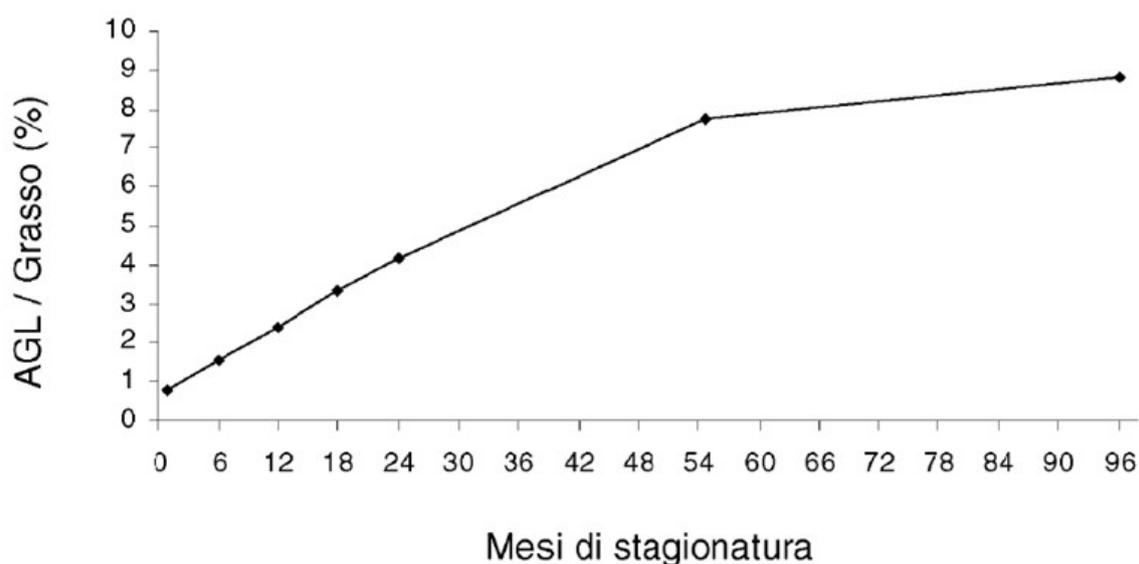


Figura 11. Indice di lipolisi del formaggio Parmigiano-Reggiano nel corso della stagionatura: valore espresso come proporzione del contenuto totale di acidi grassi liberi (AGL) rispetto al contenuto di grasso del formaggio (Malacarne et al., 2006).

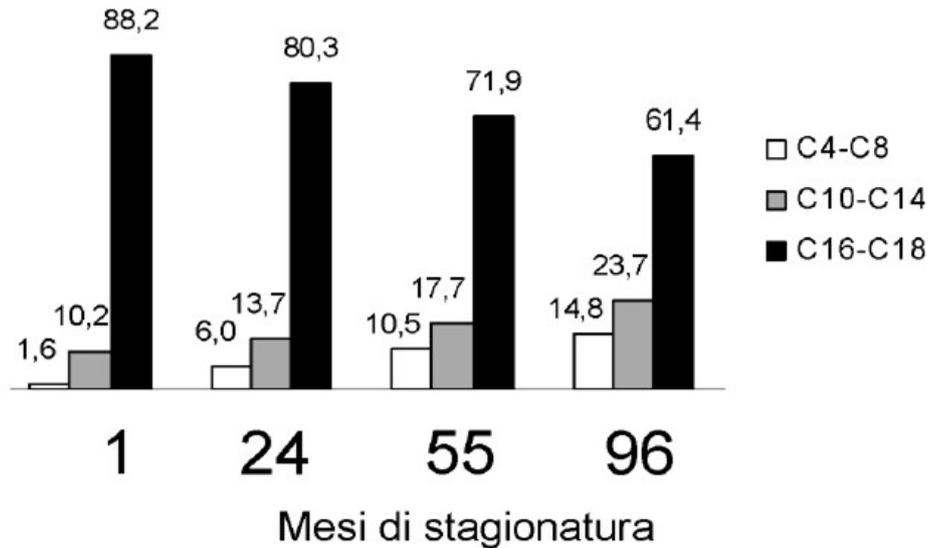


Figura 12. Composizione degli acidi grassi liberi nel corso della stagionatura del formaggio Parmigiano-Reggiano (Malacarne et al., 2006).

1.4 Caratteristiche chimico-fisiche, nutrizionali e sensoriali

Il Parmigiano Reggiano è uno dei migliori formaggi dal punto di vista nutrizionale, in quanto presenta delle caratteristiche particolarmente importanti per l'alimentazione umana. È un alimento facilmente digeribile; basti pensare che una quantità di 100 g di questo formaggio viene digerita in circa 40 minuti, mentre per 100 g di carne bovina sono necessarie più di 3 ore. Il Parmigiano Reggiano risulta inoltre un alimento particolarmente utile per le fasce di età che comprendono bambini e anziani, ma anche persone adulte data l'importanza delle sostanze nutritive di cui questo formaggio ne è composto (Garini et al., 2007; Preedy et al., 2013).

1.4.1 Caratteristiche chimico-fisiche

1.4.1.1 Umidità

L'umidità del Parmigiano Reggiano è stata studiata da Malacarne et al. (2006) durante l'intero periodo di stagionatura condotto per diversi mesi *Figura 13*. L'umidità è passata da un valore del 39% osservato durante l'estrazione della massa caseosa dalla caldaia fino a valori del 32 e 31% rilevati nel formaggio a stagionatura commerciale di 18 e 24 mesi. Il calo di umidità è risultato

significativo nei primi 6 mesi di stagionatura raggiungendo valori pari a circa il 33% . Nelle forme molto stagionate (38, 55 e 96 mesi) si è evidenziata una forte diminuzione del grado umidità della pasta fino a 55 mesi di stagionatura raggiungendo valori pari a circa 27% di umidità (Malacarne et al., 2006).

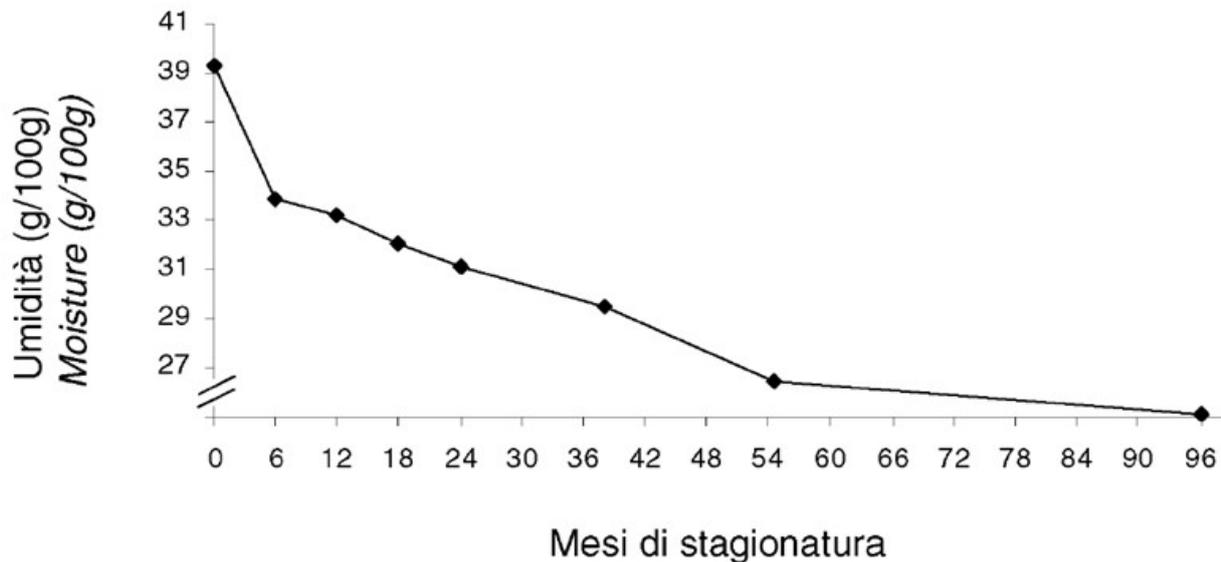


Figura 13. Umidità del formaggio Parmigiano Reggiano durante la stagionatura (Malacarne et al., 2006).

1.4.1.2 pH

Il valore del pH del Parmigiano Reggiano aumenta dall'estrazione della massa caseosa fino a 6 mesi di stagionatura. Dal sesto mese fino a 24 mesi, il pH tende a stabilizzarsi intorno a 5,38 e 5,37. In particolare, secondo McSweeney et al. (1993), il pH tende ad aumentare per la formazione di composti azotati a carattere alcalino (es. ammoniaca) o per il catabolismo dell'acido lattico. Nello studio di Malacarne et al. (2006), il calo dei valori di pH sono stati osservati a partire dal ventiquattresimo mese di stagionatura. L'incremento del valore di pH nel primo periodo di stagionatura è dovuto alla "normale" alcalinizzazione della pasta per effetto della proteolisi; mentre il decremento, sarebbe legato all'aumento più che proporzionale degli acidi grassi liberi. In effetti, come illustrato in Figura 14, la proteolisi e la produzione di ammoniaca sembrano arrestarsi dopo il 24° mese di stagionatura mentre la liberazione degli acidi grassi prosegue in maniera "costante" fino al 55° mese di stagionatura, provocando un generale decremento del pH del formaggio (Malacarne et al., 2006).

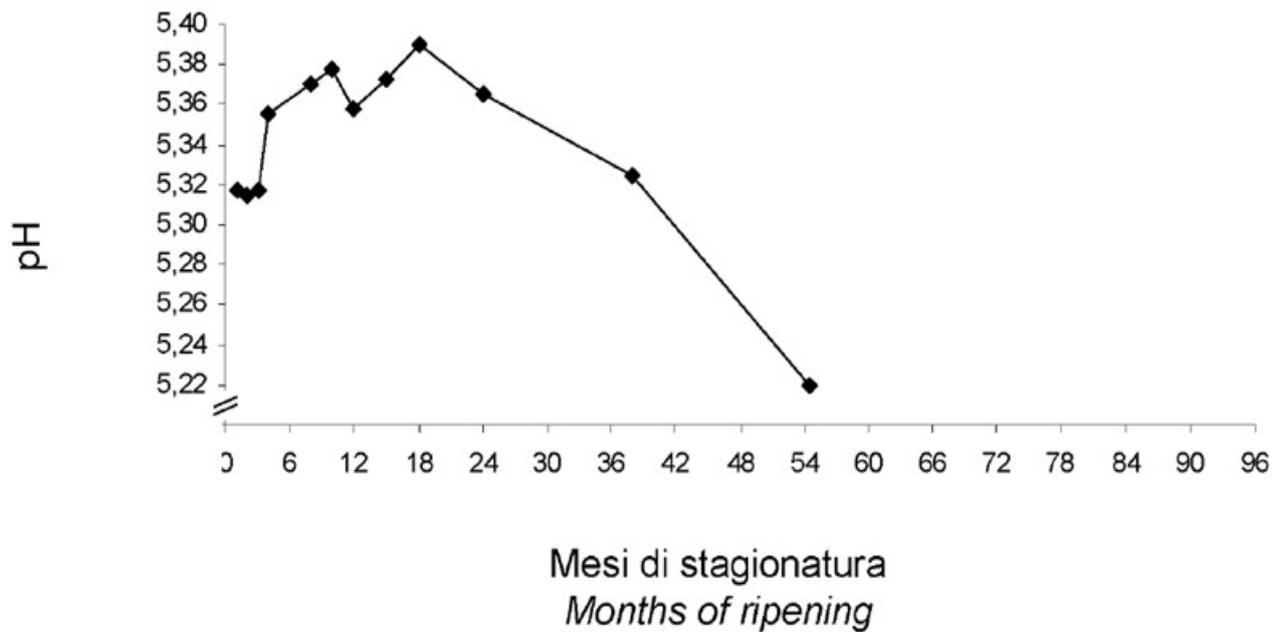


Figura 14. pH del formaggio Parmigiano Reggiano durante la stagionatura (Malacarne et al., 2006).

1.4.1.3 Cloruro di sodio

Il contenuto di cloruro di sodio (NaCl) contenuto nella forma del Parmigiano Reggiano è un fattore molto importante, in quanto è in grado di influenzare l'attività enzimatica e di conseguenza tutto il processo di stagionatura del formaggio. Il contenuto di NaCl riferito a 100 parti di acqua del formaggio aumenta in maniera repentina dalla estrazione della massa caseosa dalla caldaia fino ai primi mesi di stagionatura, in corrispondenza del termine della fase di salatura. In generale l'incremento di NaCl nella fase acquosa si registra anche nei mesi successivi alla salatura; andamento legato alla perdita di umidità che il formaggio subisce durante la stagionatura *Figura 15* (Malacarne et al., 2006).

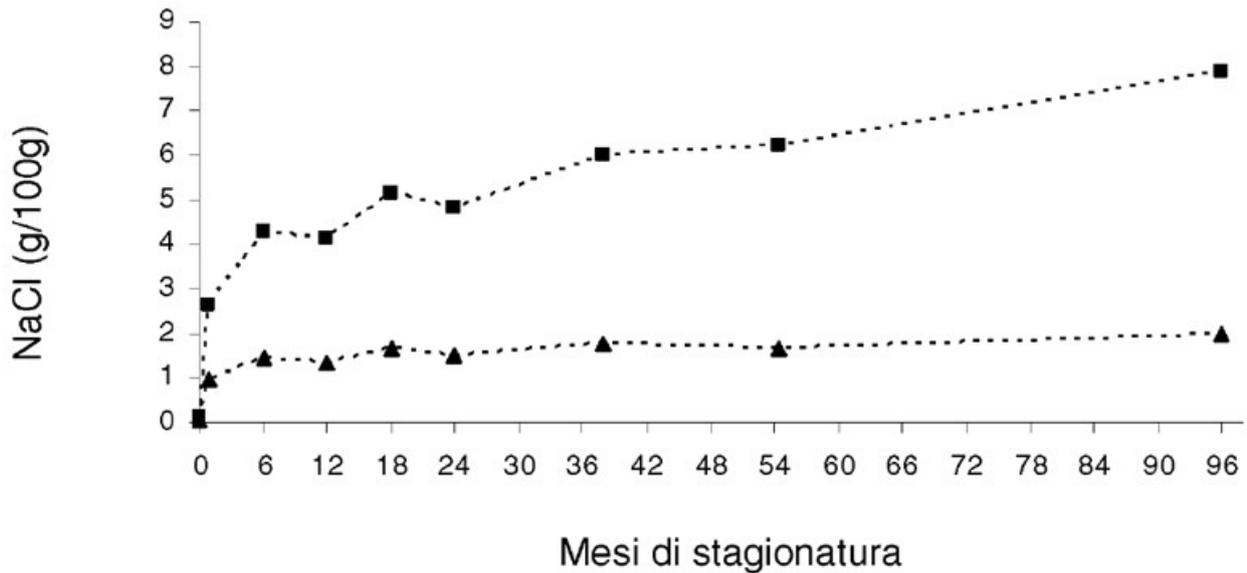


Figura 15. Contenuto di cloruro di sodio (NaCl) del formaggio Parmigiano Reggiano durante la stagionatura: grammi di NaCl su 100 g di formaggio (▲); grammi di NaCl su 100 g di acqua del formaggio (■) (Malacarne et al., 2006).

1.4.2 Valori nutrizionali

Il Parmigiano Reggiano, grazie alle sue peculiari caratteristiche nutritive e alla sua elevata digeribilità è un alimento consigliato da numerosi nutrizionisti. Dal punto di vista nutrizionale sono particolarmente rilevanti l'alto contenuto proteico e l'elevato contenuto di calcio, che rendono questo formaggio un alimento idoneo per tutte le età, particolarmente durante lo sviluppo, la gravidanza e l'età avanzata, così come per le convalescenze dovute a condizioni cliniche debilitanti (Arsenio e Strata, 1995; Preedy et al., 2013). Per quanto riguarda la terza età, il Parmigiano Reggiano è un alimento in grado di prevenire l'osteoporosi; inoltre, la quasi totale assenza di carboidrati e la ricchezza di substrati proteici e di biopeptidi rendono il Parmigiano Reggiano un alimento naturalmente funzionale, ideale per chi soffre di disturbi metabolici come l'obesità, il diabete e l'ipertensione (Preedy et al., 2013).

1.4.2.1 Proteine

Le proteine del formaggio sono costituite essenzialmente da caseina, lattoglobulina e lattealbumina che vengono in parte eliminate e in parte trasformate durante le varie fasi di manipolazione e lavorazione del prodotto. A differenza di altri tipi di formaggi, nel Parmigiano Reggiano i processi proteolitici coinvolgono la quasi totalità delle proteine. L'elevato apporto proteico, pari a circa il 33%, che il Parmigiano Reggiano è in grado di fornire alla dieta umana è una caratteristica di notevole importanza, soprattutto se associata all'elevato valore biologico di questi nutrienti (Garini et al., 2007; INRAN, 2008; Preedy et al., 2013). La proteolisi, che avviene durante il processo di stagionatura a del formaggio, dà origine a catene polipeptidiche più corte e ad una quantità di aminoacidi liberi pari al 7,5%; risultando superiore a quella riscontrata in altri tipi di formaggi. L'elevata presenza di aminoacidi *Tabella 3* caratterizza il Parmigiano Reggiano dal punto di vista nutrizionale, poiché tali sostanze possono essere facilmente assimilate e assorbite dall' organismo umano (Garini et al., 2007; Preedy et al., 2013).

Tabella 3. Composizione aminoacidica del Parmigiano Reggiano (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2007).

Aminoacido	mg/100 g di prodotto
acido glutammico	6030
prolina	3560
leucina*	2880
Lisina*	2460
acido aspartico	2260
serina	1860
tirosina	1750
fenilalanina*	1610
valina*	1360
isoleucina*	1280
treonina*	1100
metionina*	1030
alanina	940
istidina*	920
arginina	810
glicina	700
triptofano*	320
cisteina	200

*aminoacidi essenziali

Il Parmigiano Reggiano, oltre a contenere peptidi di varia lunghezza ed amminoacidi liberi, presenta anche una frazione di caseine intere. Durante la digestione, queste componenti proteiche rilasciano numerosi peptidi bioattivi *Tabella 4*, i quali svolgono diverse funzioni all'interno dell'organismo umano, come: il trasporto del calcio nell'intestino, il trasporto di aminoacidi, stimolano il sistema immunitario, oltre ad occuparsi della secrezione di ormoni come l'insulina, la somatostatina e la esorfina, quest'ultima è caratterizzata dall'aver un'attività simil oppioide, svolgendo un effetto analgesico che induce una sensazione di benessere (Arsenio e Strata, 1995; Preedy et al., 2013).

Tabella 4. Principali peptidi bioattivi presenti nel Parmigiano Reggiano e descrizione del loro ruolo fisiologico (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2007).

Peptidi bioattivi	Proteina precursore	Bioattività
casomorfine	α -, β -caseina	Agonista oppioide
α -lattorfina	α -lattoalbumina	Agonista oppioide e ACE-inibitoria
β -lattorfina	β -lattoalbumina	Agonista oppioide e ACE-inibitoria
lattoferroxine	lattoferrina	Antagonista oppioide
casoxina C	κ -caseina	Antagonista oppioide
casoxina D	α_{s1} -caseina	Antagonista oppioide
casochinine	α_{s1} -, β -caseina	ACE-inibitoria e immunoregolatoria
lattochine	α -lattoalbumina, β -lattoglobulina sieroalbumina	ACE-inibitoria
immunopeptidi	α -, β -caseina α -lattoalbumina, β -lattoglobulina	Immunoregolatoria
lattoferricina B	lattoferrina	Immunoregolatoria e antimicrobica
casocidina	α_{s2} -caseina	Antimicrobica
isracidina	α_{s1} -caseina	Antimicrobica
casoplateline	κ -caseina	Antitrombotica
peptide inibitore della trombina	κ -caseina	Antitrombotica
peptide inibitore della trombina	lattoferrina	Antitrombotica
caseinofosfopeptidi	α_{s1} -, α_{s2} -, β -caseina	Legame e trasporto di minerali

1.4.2.2 Lipidi

La quota di lipidi presente nel Parmigiano Reggiano è compresa tra un intervallo di valori compresi tra il 25,5% ed il 31,4%, con un valore medio di 28,4% molto importante dal punto di vista nutrizionale (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2007). Durante la stagionatura del Parmigiano Reggiano intervengono delle importanti modificazioni della frazione lipidica dovute ad una parziale lipolisi che rende disponibile una certa quota di acidi grassi in forma libera, facilitandone l'assorbimento, esattamente per come avviene per gli amminoacidi (Preedy et al., 2013). Il profilo lipidico del latte dipende dall'alimentazione delle bovine, in particolare, la nutrizione delle bovine con foraggio fresco durante l'estate, porta ad un aumento della quantità di acidi grassi insaturi presenti nel latte (Preedy et al., 2013). I trigliceridi presenti nel Parmigiano Reggiano sono caratterizzati dall'essere composti da più del 25% da acidi grassi a media e corta catena, i quali, essendo facilmente assorbibili e rapidamente utilizzabili, a differenza di quelli a lunga catena, costituiscono una fonte immediata di energia (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2007). All'interno della frazione lipidica del Parmigiano Reggiano sono di notevole importanza alcuni composti, tra cui i fosfolipidi antiossidanti, come la fosfatidilserina e la sfingomieline ed i CLA a cui sono attribuiti numerosi effetti benefici, come carcinogenesi inibitori, antiossidanti, modulatori del metabolismo e del sistema immunitario; trovandosi nel Parmigiano in quantità di circa 3 mg/g di lipidi (Preedy et al., 2013).

1.4.2.3 Carboidrati

I carboidrati sono pressoché assenti nel formaggio Parmigiano Reggiano; questo prodotto è caratterizzato dall'assenza di lattosio, il quale, durante le prime fasi di stagionatura viene trasformato in acido lattico comportando un'immediata acidificazione del mezzo, costituendo uno dei principali cardini per l'ottenimento di tale prodotto (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2007). Grazie allo studio condotto dal Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano (2007), sono stati analizzati diversi campioni di Parmigiano, al fine di valutare la composizione del lattosio presente nei vari stadi di stagionatura, attraverso dei test biochimici come l'*High Performance Anion Exchange Chromatography* (HPAEC) e la *Thin Layer Chromatography* (TLC). I risultati ottenuti confermano che questo formaggio può essere definito come un prodotto naturalmente privo di lattosio (<0,1g/100 g di prodotto), come illustrato dalla *Tabella 5*.

Tabella 5. Concentrazione di lattosio espresso come mg lattosio/100 g di Parmigiano Reggiano e come mg lattosio/100 kcal, in rapporto al tempo della stagionatura espresso in mesi (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2007).

Campione	Mesi	mg latt/100 gr	mg latt/100kcal
1	1	n.d. (*)	n.d.
2	2	0,0867	0,0232
3	4	0,11	0,0294
4	10	0,16	0,0428
5	6	0,2	0,0535
6	12	0,2	0,0535
7	36	0,3867	0,1034
8	20	0,1967	0,0526
9	7	0,0733	0,0196
10	6	0,0567	0,0152
11	12	0,19	0,0508
12	20	0,2433	0,0651
13	11	0,125	0,0334
14	17	n.d.	n.d.

(*) : non dosabile

1.4.2.4 Vitamine

Le vitamine sono un insieme eterogeneo e complesso di sostanze chimiche acaloriche che devono essere introdotte dalla dieta, in quanto non sono sintetizzabili dall'organismo (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2007). Il contenuto vitaminico del Parmigiano Reggiano *Tabella 6* risulta essere molto interessante; esso è caratterizzato da un elevato quantitativo di vitamine del gruppo B, tra cui la B2, la B6 e la B12. Tra le vitamine liposolubili sono presenti la vitamina D e la vitamina A, quest'ultima rimane in quantità sostanziali durante tutto il periodo di stagionatura.

Il quantitativo vitaminico presente nel Parmigiano Reggiano varia in relazione alla stagionatura, nonostante ciò, esso è comunque in grado di coprire un'elevata percentuale del fabbisogno vitaminico giornaliero nei bambini e negli adulti. Nello specifico, una porzione di 100 g di Parmigiano Reggiano fornisce oltre il 25% del fabbisogno di vitamina B2, circa il 40% di quello della vitamina A e tra il

60 e 100% del fabbisogno di vitamina B6; inoltre, fornisce un quantitativo di vitamina B12 superiore a quello fisiologicamente richiesta dall'organismo (Preedy et al., 2013).

Tabella 6. Contenuto vitaminico in µg/100 g di Parmigiano Reggiano fresco (6-12 mesi) e stagionato (22-24 mesi) (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2007).

<i>Vitamina</i>	<i>6-12 mesi*</i>	<i>22-24 mesi**</i>
Vitamina A	348	270
β-carotene	638	107
Vitamina E	715	440
Vitamina B ₁	35	34
Vitamina B ₂	360	370
Vitamina B ₆	99	110
Vitamina PP	18	55
Vitamina B ₁₂	3,2	4,2
Ac. pantotenico	280	320
Biotina	13	23

*Valori medi di 10 campioni

** Valori, medi di 60 campioni

1.4.3 Caratteristiche sensoriali e morfologiche

Il Parmigiano Reggiano è un formaggio semigrasso di consistenza dura ed una struttura granulare caratterizzata dalla presenza di cristalli di tirosina. Grazie ad un'analisi condotta da Noel et al. (1996) sulle proprietà di texture del Parmigiano Reggiano, sono stati elencati vari parametri reologici in relazione agli sforzi di compressione e deformazione. L'analisi dimostra che il modulo elastico aumenta con l'aumentare della stagionatura del formaggio, indicando una notevole diminuzione dell'elasticità del Parmigiano ed un aumento della rigidità strutturale. La stagionatura del Parmigiano influisce sul contenuto di acqua, con un progressivo calo di quest'ultima al progredire

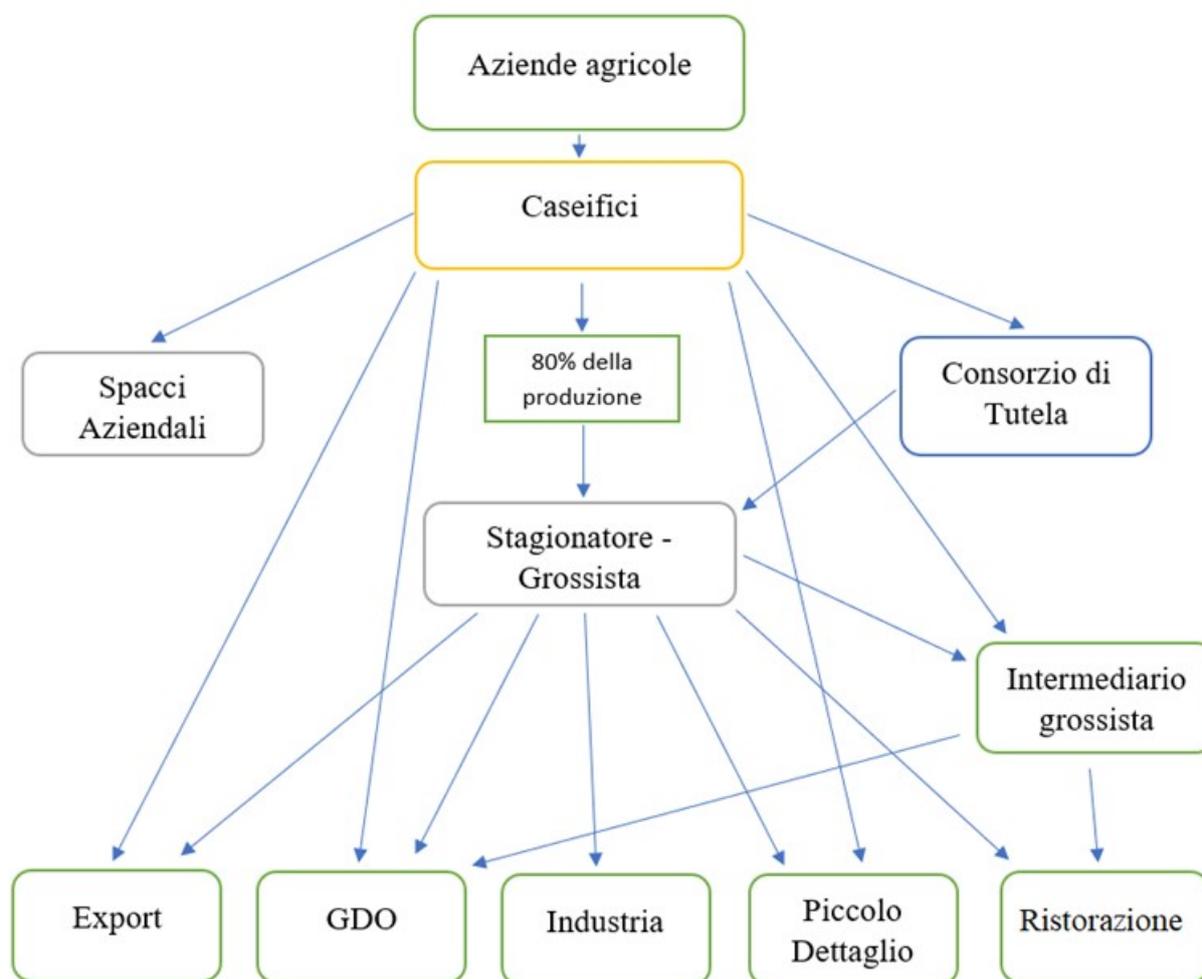
dell'invecchiamento. L'acqua ha un ruolo importante nel formaggio poiché può agire da lubrificante tra le molecole, influenzando la deformazione elastica della matrice proteica che risulta più facile quando il contenuto in acqua è più elevato come nel caso del Parmigiano Reggiano a bassa stagionatura (Noel et al., 1996). Durante la stagionatura la matrice proteica del Parmigiano Reggiano viene scomposta dalla proteolisi provocando una debolezza strutturale del formaggio e un aumento del valore di azoto solubile. Questa debolezza strutturale sembra secondo Noel et al (1996) indurre una diminuzione della deformazione alla frattura con l'età; influenzando la struttura in modo tale che le crepe all'interno del corpo del formaggio progrediscono con maggiore velocità nei formaggi più vecchi rispetto a quelli più giovani. Lo stress e il carico alla rottura sono parametri influenzati principalmente dal prodotto e quindi dal formaggio stesso mentre il modulo elastico e la deformazione alla frattura sono influenzati dall'età e dal grado di stagionatura del formaggio (Noel et al., 1996).

1.5 Commercio e vendita del formaggio “Parmigiano Reggiano DOP”

1.5.1 Canali di vendita

Dal punto di vista commerciale, il Parmigiano Reggiano si avvale di diversi canali di distribuzione che si distinguono per il numero di intermediari utilizzati. I canali di vendita maggiormente usati sono la commercializzazione diretta, che permette di collocare il prodotto direttamente al cliente finale; la commercializzazione corta, destinata ai canali di vendita al dettaglio ed alla ristorazione; ed infine la commercializzazione lunga, ovvero il canale di vendita attraverso cui transita la maggior parte del prodotto. In particolare, la commercializzazione lunga si suddivide a sua volta a seconda degli intermediari coinvolti; la commercializzazione con un solo intermediario prevede il passaggio del Parmigiano Reggiano attraverso lo stagionatore, il quale lo distribuisce ai diversi operatori distributivi; la seconda via prevede la presenza di due intermediari, nella quale il prodotto può essere acquistato da un secondo intermediario commerciale. La presenza di un secondo intermediario è necessaria al fine di creare un anello di congiunzione tra l'azienda stagionatrice e il dettagliante; consentendo a quest'ultimo di gestire il suo canale di vendita senza l'obbligo di acquistare grandi partite di prodotto (Franchini, 2019). In particolar modo nella *Tabella 7* è individuata la Filiera del Parmigiano Reggiano e la distribuzione del valore.

Tabella 7. Distribuzione del valore lungo la filiera del Parmigiano Reggiano (adattato da Franchini, 2019).



1.5.2 Export

Secondo i dati raccolti dal Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, i valori economici riguardanti l'esportazione hanno una tendenza positiva, soprattutto nei mercati internazionali. I dati di vendita del primo semestre 2022, raccolti dal Consorzio di tutela, mostrano come le esportazioni del Parmigiano Reggiano, e di conseguenza le vendite, abbiano raggiunto dei valori positivi rispetto al primo semestre 2021, quest'ultimo chiuso con un giro d'affari record. Nel 2022 le esportazioni sono aumentate dell'1,6%, in particolare, è stato registrato un incremento delle vendite rispetto al 2021 in Spagna con un +14,7%, negli Stati Uniti con un +12,6% e in Francia con un +8,3% (Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano, 2022).

Capitolo 2 – Analisi di texture empirico-imitative dei formaggi

Le caratteristiche reologiche di un formaggio caratterizzano il comportamento di deformazione quando quest'ultimo è sottoposto a sollecitazioni o sforzi. In base al comportamento di sollecitazione/deformazione, i materiali possono essere generalmente classificati come solidi elastici ideali, liquidi viscosi ideali o viscoelastici. I formaggi contengono acqua e componenti solide come proteine, grassi e carboidrati, per questo presentano le caratteristiche sia di un solido elastico sia di un fluido viscoso e vengono definiti viscoelastici. La consistenza del formaggio è un attributo sensoriale complesso risultante da una combinazione di proprietà fisiche percepite dai sensi del tatto, della vista e dell'udito durante il consumo. La componente della texture tattile comprende le proprietà meccaniche del formaggio che derivano da sollecitazioni applicate durante il consumo come, ad esempio, il taglio con gli incisivi e la compressione tra i molari (Fox et al., 2017). La reologia e i parametri sensoriali del formaggio dipendono dalla macrostruttura, dalla microstruttura, dalla composizione e dalle caratteristiche quali pH e temperatura. La principale caratteristica strutturale da cui dipende la deformazione del formaggio è la rete proteica, dovuto in particolare alla concentrazione delle proteine e dal grado di idrolisi e idratazione delle stesse (Fox et al., 2017). L'analisi del profilo di texture (TPA) è un test imitativo che ha lo scopo di misurare la risposta del formaggio alla compressione, simulando lo schiacciamento ripetuto di un pezzo di formaggio durante la masticazione. Il profilo stress/tempo generato durante la doppia compressione consente di determinare una serie di proprietà meccaniche come la durezza, la coesività, l'adesività, la masticabilità e la gommosità, determinando i parametri sensoriali (Mohidus Samad Khan, 2021).

2.1 Principi e generalità

In campo alimentare il termine texture (o consistenza) viene utilizzato per indicare la manifestazione tattile sensoriale e funzionale della struttura di prodotti alimentari. In modo particolare la texture è un attributo multiparametrico attraverso la quale vengono descritte le proprietà molecolari, microscopiche o macroscopiche, meccaniche e di superficie di alimenti rilevati attraverso i sensi della vista, dell'udito, del tatto e della cinestesica esclusi odori e sapori (Mohidus Samad Khan, 2021). Grazie alla texture è quindi possibile descrivere in modo dettagliato le caratteristiche di un alimento destinato al consumo nel momento in cui esso viene sottoposto a delle forze di stress e compressione.

Questi attributi vengono espressi tramite l'impiego di parametri, grazie alla quale è possibile definire le caratteristiche texturali di un prodotto alimentare (Mohidus Samad Khan, 2021):

- **Consistenza:** le sensazioni derivanti dalla stimolazione dei recettori meccanici, specialmente quelli che si trovano nella regione della bocca; sensazioni che variano a seconda della texture dell'alimento.
- **Durezza e morbidezza:** caratteristiche che descrivono la resistenza di un prodotto alla deformazione e alla rottura.
- **Tenerezza:** attributo che descrive le proprietà di un alimento durante la masticazione mostrando una moderata o bassa resistenza alla rottura.
- **Crocantezza:** misura l'intensità cumulativa percepita dovuta all'incremento ripetuto di masticazioni effettuate fino a cinque volte con i molari.

La texture è un attributo sensoriale che i consumatori utilizzano per valutare l'accettabilità degli alimenti e che influenza le decisioni nell'acquisto dei prodotti alimentari (Mohidus Samad Khan, 2021). La reologia in campo alimentare indica lo studio della deformazione e del flusso delle materie prime, dei prodotti intermedi e dei prodotti finali dell'industria agroalimentare (Bourne, 2002). La scienza che si occupa dello studio delle caratteristiche reologiche degli alimenti risulta avere numerose applicazioni nel campo dell'accettazione delle materie prime utilizzate nella lavorazione e manipolazione degli alimenti. Ad esempio, gli attributi reologici della cagliata del latte o dei prodotti carnei sono aspetti di notevole importanza nella produzione di prodotti di qualità per formaggi e salumi (Bourne, 2002). La reologia a fini della qualità alimentare diventa, insieme alla texture, una caratteristica molto importante per la valutazione dell'accettabilità di un prodotto edibile. Gli aspetti reologici sono in grado di influenzare l'aspetto e le proprietà strutturali degli alimenti. In particolar modo vengono influenzati il sapore e le modalità con la quale il cibo si scompone all'interno della cavità orale, determinando il rilascio dall'alimento di particolari composti aromatici (Bourne, 2002).

2.2 Strumenti analitici

L'utilizzo di sistemi dinamometrici permette di studiare e comprendere le caratteristiche degli alimenti, tra cui la rigidità, la friabilità, la morbidezza, l'elasticità e la masticabilità ed interpretare la complessità strutturale studiandone le proprietà a determinate condizioni, in modo da monitorare i

processi di trasformazione e conservazione (Mohidus Samad Khan, 2021). Per analizzare la consistenza degli alimenti, così come le loro proprietà, vengono utilizzati degli strumenti di misura che permettono di eseguire una serie di procedure che si basano principalmente sul principio della misurazione della forza in funzione del tempo, oppure della forza applicata in funzione della distanza percorsa. Gli strumenti di texture sono dotati di peculiari sonde in grado di generare una deformazione sul campione. I campioni sottoposti a test di compressione o trazione causano lo spostamento della sonda, la quale a sua volta genera una resistenza che viene misurata durante l'analisi riportando i dati all'interno di curve sforzo-deformazione.

2.2.1 Analisi texture profile analysis (TPA)

Il test TPA è il metodo universale per la misura della texture e si basa sull'applicazione di due o più cicli di compressione del campione tra due superfici parallele *Figura 16*. Lo scopo di effettuare due o più cicli dinamometrici è quello di simulare la masticazione dell'alimento. Ogni ciclo è composto da due fasi. Una prima fase di compressione, durante la quale il campione viene compresso di una percentuale della sua altezza normale dove il materiale viene compattato e al termine dello sforzo si ottiene un picco di massimo registrato sul grafico. Successivamente viene effettuata una decompressione per un tempo prestabilito, durante la quale il campione recupera una parte della sua forma originaria. Dopo un definito intervallo di tempo che viene stabilito a seconda del campione da analizzare inizia la seconda compressione con la ripetizione del ciclo (Mohidus Samad Khan, 2021, Bourne, 2002). È necessario ribadire che gli alimenti non sono dei materiali del tutto elastici e la loro struttura interna durante il secondo ciclo di compressione varia e la risposta del prodotto sarà inevitabilmente differente. In particolar modo il profilo di texture causata dalla seconda compressione sarà tanto più diverso dal precedente quanto più la struttura del materiale sarà modificata durante il primo ciclo di compressione. In *Figura 17* è riportato un esempio di grafico dei due cicli dinamometrici applicati ad un prodotto alimentare.

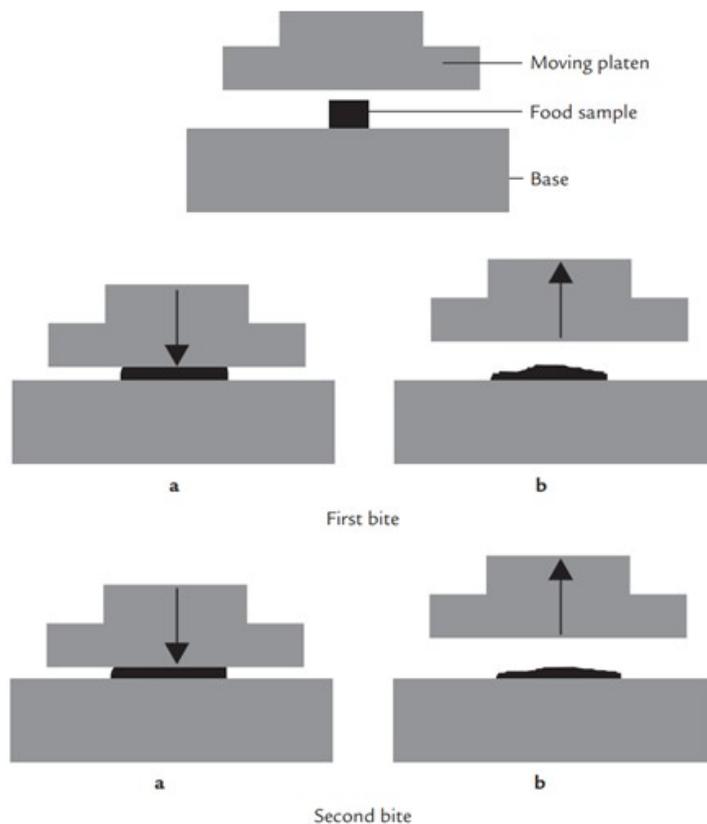


Figura 16. Diagramma delle due compressioni necessarie per il test di Texture Profile Analysis (TPA): (a) azioni di discesa durante il primo e il secondo morso, (b) azioni di salita durante il primo e il secondo morso (Bourne, 2002).

Quando si eseguono delle analisi di TPA il periodo che segue la preparazione dei campioni è probabilmente la fase più critica per l'ottenimento di buoni risultati. La dimensione stessa dei materiali sottoposti all'analisi è molto importante come è essenziale evitare l'effetto di invecchiamento e quello marginale del campione. Il grado di compressione, la dimensione dello stantuffo e la velocità della testa trasversale devono essere mantenuti invariati, utilizzando le stesse caratteristiche operative dello strumento durante l'esecuzione delle prove (Bourne, 2002).

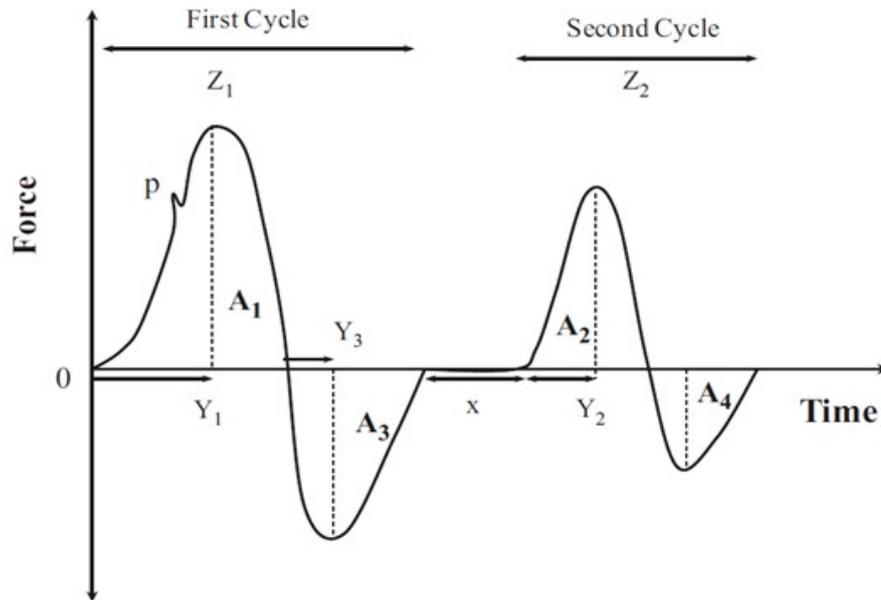


Figura 17. Esempio di grafico del test Texture Profile Analysis (TPA); *p*: Punto di frattura, Z_1 : Tempo dei primi cicli di compressione e decompressione, Z_2 : Tempo dei secondi cicli di compressione e decompressione, A_1 : Area del primo ciclo di compressione, A_2 : Area del primo ciclo di decompressione, A_3 : Area del primo ciclo di decompressione, A_1 : area del primo ciclo di compressione, A_2 : area del primo ciclo di decompressione, A_3 : area del primo ciclo di decompressione, A_4 : area del primo ciclo di decompressione, A_4 : area del secondo ciclo di decompressione, Y_1 : tempo per raggiungere il picco del primo ciclo di compressione, Y_2 : tempo per raggiungere il picco del secondo ciclo di decompressione, Y_2 : tempo per raggiungere il picco del secondo ciclo di compressione, Y_3 : Tempo per raggiungere il picco del primo ciclo di decompressione, x : tempo di ritardo tra il primo e il secondo ciclo di ciclo di compressione-decompressione (Mohidus Samad Khan, 2021).

2.2.2 Analisi three point bending (TPB)

I test *Three Point Bening* (TPB), denominati anche test di flessione e rottura, vengono solitamente applicati ad alimenti con una forma rettangolare o a disco come, ad esempio, i biscotti. In *Figura 18* è illustrato uno schema a sezione della sonda e del porta campione utilizzati per questa analisi. La sonda e il supporto utilizzato vengono anche chiamati a tripla trave in cui il campione poggia su due supporti ed una terza barra di compressione, la quale si muove tra i due supporti, genera una

compressione e di conseguenza deforma e piega il prodotto fino a spezzarlo (Bourne, 2002). La curvatura viene misurata come la distanza non sostenuta dal materiale in oggetto o dall'angolo che essa sottende rispetto al piano orizzontale.

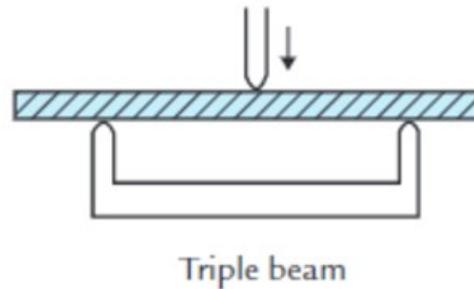


Figura 18. Esempio figurato di Three Point Bending (Bourne, 2002).

Gli alimenti croccanti sono caratterizzati da una consistenza rigida e inflessibile che si rompe improvvisamente una volta raggiunta la forza di frattura.

2.2.3 Analisi di taglio

Con il test di taglio si intende lo scorrimento delle parti contigue di un corpo l'una rispetto all'altra in una direzione parallela al piano di contatto sotto l'effetto di una forza tangenziale alla sezione cui agisce (Bourne, 2002). In generale con il termine taglio si intende qualsiasi azione che provoca la divisione del prodotto in 2 o più parti *Figura 19 (Bourne, 2002)*.

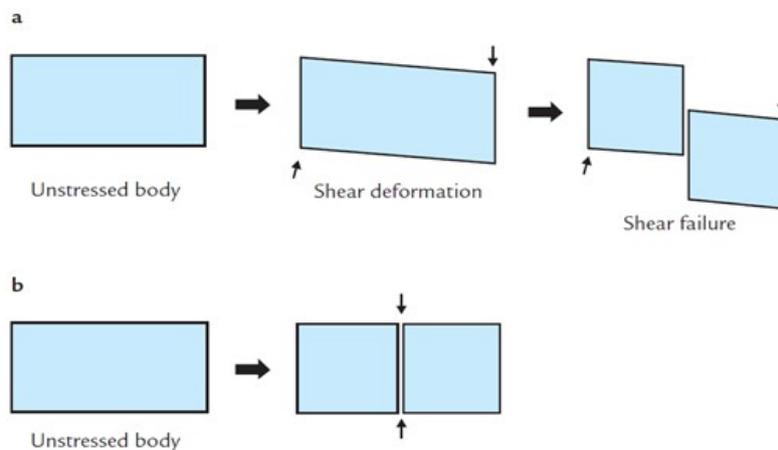


Figura 19. Confronto tra (a) rottura per taglio con deformazione e cedimento del campione (b) rottura per taglio senza cedimento del campione (Bourne, 2002).

L'apparecchio di taglio più noto è il Warner-Bratzler Shear *Figura 20* (Warner, 1928, Bourne, 2002). La parte operativa di questo strumento è costituita da una lama in acciaio inossidabile dello spessore di 1 mm, a cui è collegato un dinamometro che misura la forza massima incontrata durante l'azione di taglio. Secondo Bourne (2002), il tipo di rottura a cui va incontro il campione sembra essere dovuta principalmente ad una tensione, causata dall'allungamento del campione attorno alla lama dello strumento. In tal modo è possibile stabilire un modello di sollecitazione complesso, costituito dalla combinazione di tensione, compressione e taglio impartiti; evidenziando come la maggior parte delle prove di taglio applicate sugli alimenti abbiano un andamento simile, dovuto al cedimento per trazione del campione (Bourne, 2002).

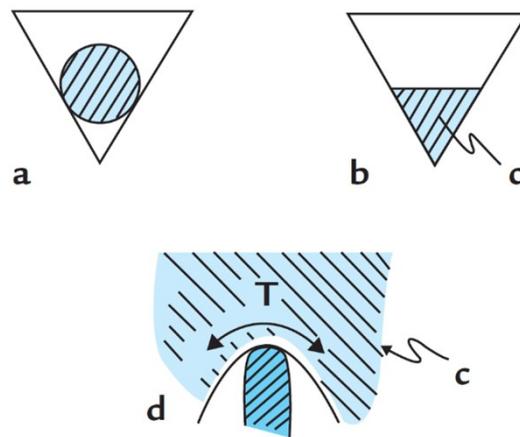


Figura 20. Schema di taglio nella lama triangolare della cesoia Warner-Bratzler. a, provino circolare non sollecitato; b, il campione si deforma sotto compressione per riempire lo spazio disponibile; c, campione; d, tensione si verifica intorno al bordo della lama di taglio; T, sollecitazione di trazione (Bourne, 2002).

Oltre allo strumento sopracitato, esistono differenti apparecchiature di taglio che vengono utilizzate per una ampia varietà di alimenti; esse sono progettate e scelte a seconda della struttura dell'alimento e dei parametri d'interesse per l'analisi. Ad esempio, la cella di taglio Kramer *Figura 21*, la quale simula la singola morsicatura che viene effettuata sul cibo, fornisce informazioni sulla caratteristica del morso, la croccantezza e la compattezza del prodotto; questo tipo di cella viene utilizzata per prodotti a base di carne, pesce, frutta e verdura, così anche per cereali e patatine chips. Un ulteriore strumento adoperato per il test di taglio è la taglierina *Figura 22*, costituita da un filo d'acciaio

inossidabile capace di imprimere una forza al campione e tagliarlo, in tal modo è possibile analizzare la consistenza del burro e determinare la forza di formaggi, uova e verdura (Zwickroell, 2022).



Figura 21. Cella di taglio Kramer (Zwickroell, 2022).



Figura 22. Taglierina per test di taglio sul burro (Zwickroell, 2022)

PARTE SPERIMENTALE

Capitolo 3 – Materiali e metodi

3.1 Campioni di “Parmigiano Reggiano DOP”

I campioni oggetto di questa sperimentazione sono stati 27 punte (spicchi) di Parmigiano Reggiano, prelevate da differenti caseifici aderenti al consorzio di tutela, conferiti presso il Campus di Scienze degli Alimenti di Cesena in diversi intervalli temporali, tra gennaio e giugno 2022. Nella Tabella 1 sono di seguito riportati i codici dei campioni, sia quelli impiegati dal consorzio di tutela, che quelli utilizzati durante la sperimentazione nel Campus di Scienze degli Alimenti di Cesena. Tutte le analisi sono state effettuate dopo aver condizionato i campioni a temperatura ambiente (25°C) per circa un'ora. Inoltre, i campioni sono stati prelevati dalla porzione centrale di ogni punta, ad una distanza di 6 cm dalla crosta laterale/verticale e di 3 cm da quella superficiale/orizzontale al fine di garantire un'elevata omogeneità e standardizzazione dei campioni stessi e delle analisi effettuate.

Tabella 8. Data di conferimento e relative codifiche dei campioni di Parmigiano-Reggiano, con relativa corrispondenza tra quelle adottate da consorzio di tutela al momento del conferimento e quelle adottate durante lo svolgimento delle analisi

DATA CONFERIMENTO	CODIFICA CONSORZIO	CODIFICA UNIBO
31/01/22 n°7 campioni	P.14752	GE1
	P.14754	GE2
	P.14759	GE3
	P.14760	GE4
	P.14761	GE5
	P.14762	GE6
	P.14763	GE7
08/02/22 n°6 campioni	P.14867	F1
	P.14868	F2
	P.14833	F3
	P.14869	F4
	P.14834	F5
	P.14870	F6
29/04/22 n°7 campioni	P.15082	MAR1
	P.15083	MAR2
	P.15430	MAG1
	P.15431	MAG2
	P.15439	MAG3
13/06/22 n° 7 campioni	P.15440	MAG4
	P.15441	MAG5
	P.15787	GIU1
	P.15788	GIU 2
	P.15789	GIU 3
	P.15790	GIU 4
	P.15791	GIU 5
P.15792	GIU 6	
P.15793	GIU 7	

N.B Le sigle differenti (GE, F, MAR, MAG, GIU), inserite al momento delle analisi sono state utilizzate al fine di semplificare la codificazione e sono associate ai diversi mesi di conferimento del prodotto, così come riportato nella prima colonna della tabella.

3.2 Determinazione dell'attività dell'acqua

L'analisi dell'attività dell'acqua (a_w), definita come il rapporto tra la pressione/tensione di vapore dell'acqua dei campioni e la pressione/tensione di vapore dell'acqua pura, è stata effettuata utilizzando un igrometro a punta di rugiada *AcquaLab-Water Activity Meter mod. SERIES 3TE* (Decagon Device, Inc., Nelson Court, NE) *Figura 23*, posizionando circa 3 g di campione opportunamente ridotto in piccole scaglie sul fondo del porta-campione, ed effettuando 3 repliche per ogni campione. Lo strumento per l'analisi dell'attività dell'acqua è stato calibrato con a_w standard 1.000 e 0.500 alla temperatura di 20 °C.



Figura 23. Strumento AcquaLab utilizzato per la misurazione dell'attività dell'acqua dei campioni.

3.3 Determinazione della texture

Al fine di caratterizzare i campioni dal punto di vista strutturale e della texture, questi sono stati sottoposti a differenti test reologici qui sotto riportati:

- Test di taglio;
- Texture Profile Analysis (TPA);
- Test di Three Point Bending (TPB).

I test meccanici di texture sopra elencati sono stati effettuati mediante l'ausilio di un *Texture Analyzer mod. TA.HDi500* (Stable Micro System, Surrey, UK) opportunamente calibrato prima di ogni analisi.

3.3.1 Test di Taglio

Il test di taglio è stato effettuato su campioni di Parmigiano Reggiano aventi dimensione pari a 2 x 2 cm, ottenuti dalla porzione centrale della punta di Parmigiano in modo tale da ottenere una forma cubica del campione. Il test di taglio consiste nell'applicare principalmente uno sforzo di taglio ed in minima parte anche uno stress di deformazione-compressione. Questa analisi è stata eseguita attraverso la discesa a velocità costante di una lama piatta posizionata perpendicolarmente rispetto al campione, fino a determinare la completa rottura dello stesso *figura 24*.

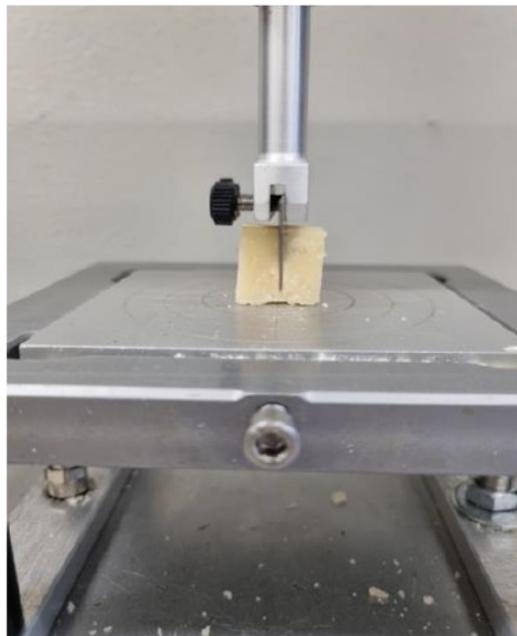


Figura 24. Analisi di un test di taglio effettuato su un campione 2 x 2 cm di Parmigiano Reggiano.

Dal dinamogramma ottenuto con questo test, è stato ricavato il parametro relativo alla durezza (N) del campione, inteso come la resistenza o forza massima che esso oppone alla rottura e allo sforzo di compressione applicato dal macchinario. Questo andamento viene espresso graficamente come il picco di forza massima rilevato durante il test e in *Figura 25* viene ripotato un esempio a titolo esplicativo.

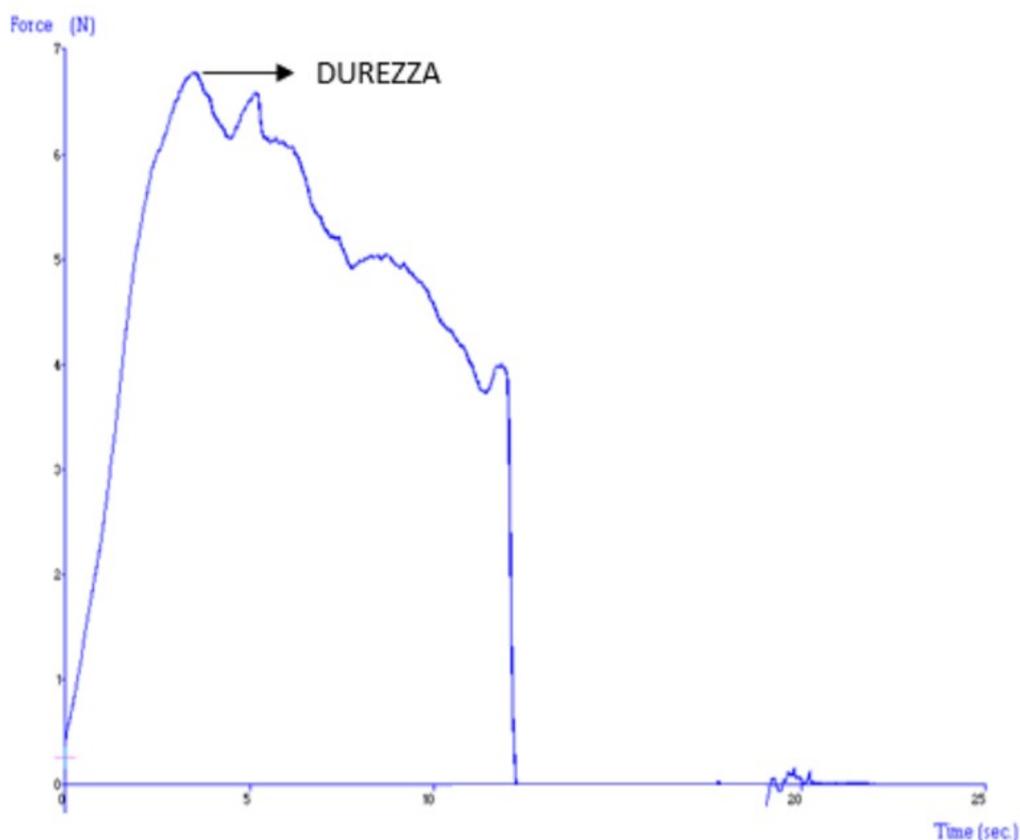


Figura 25. Esempio esplicativo di curva sforzo-deformazione ottenuta dall'analisi del test di taglio effettuato su un campione di Parmigiano Reggiano.

Le impostazioni utilizzate per l'analisi del test di taglio per campioni 2 x 2 cm sono riportate di seguito:

- Cella di carico: 25 kg;
- Calibrazione probe con lama: 40 mm e 100 g;
- Velocità del test (discesa della sonda): 0.83 mm/s;
- Compressione: 10 mm;
- 4 ripetizioni per ogni campione.

3.3.2 Test di Texture Profile Analysis (TPA)

Il Texture Profile Analysis (TPA) è un'analisi che consiste nell'applicazione di due cicli dinamometrici, o meglio due singole compressioni seguite rispettivamente da due decompressioni applicate ad un campione preso in esame. In questa analisi i cicli dinamometrici sono stati effettuati

mediante l'ausilio di una sonda piatta di forma quadrata di dimensioni pari a 7 x 7 cm e con uno spessore di 0,5 cm *Figura 26*.

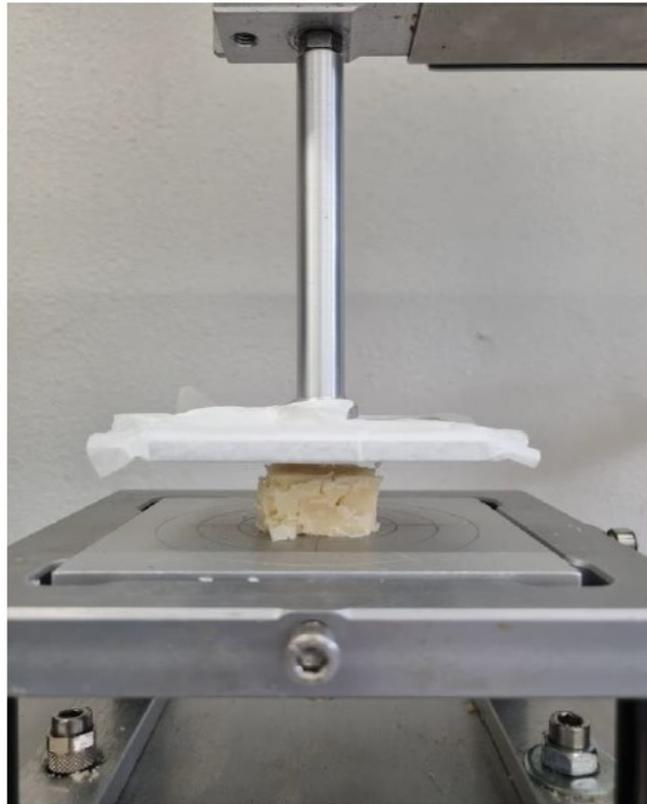


Figura 26. Analisi di un test Texture Profile Analysis (TPA) effettuato su un campione di Parmigiano Reggiano.

Questa analisi è nota anche come test di masticazione, in quanto i due cicli di compressione e decompressione sono applicati al fine di simulare l'azione della masticazione. Nella prima parte del test, i campioni di Parmigiano aventi dimensioni pari a 2 x 2 cm, sono stati sottoposti ad una compressione pari al 50% della loro altezza iniziale. Durante la fase di compressione il materiale in esame viene compattato per poi passare di seguito ad una fase di decompressione (rimozione dello sforzo) durante la quale si è registrato il recupero di una parte della deformazione prodotta dalla prima compressione. Dopo circa 10 s, i campioni di Parmigiano sono stati sottoposti ad una seconda compressione e decompressione. Il secondo profilo che si ottiene risulta essere differente dal primo per via dell'intensità delle modificazioni strutturali che sono state operate durante il primo ciclo dinamometrico. In *Figura 27* viene rappresentato l'esempio di un grafico di doppia decompressione applicato su un campione di Parmigiano Reggiano.

Le impostazioni che sono state utilizzate per l'analisi del test di TPA per campioni 2 x 2 cm sono riportate di seguito:

- Cella di carico: 25 kg;
- Calibrazione probe con superficie rettangolare: 40 mm e 100 g;
- Compressione: 10 mm;
- Velocità del test (discesa della sonda): 0,42 mm/s;
- 4 repliche per ogni campione.

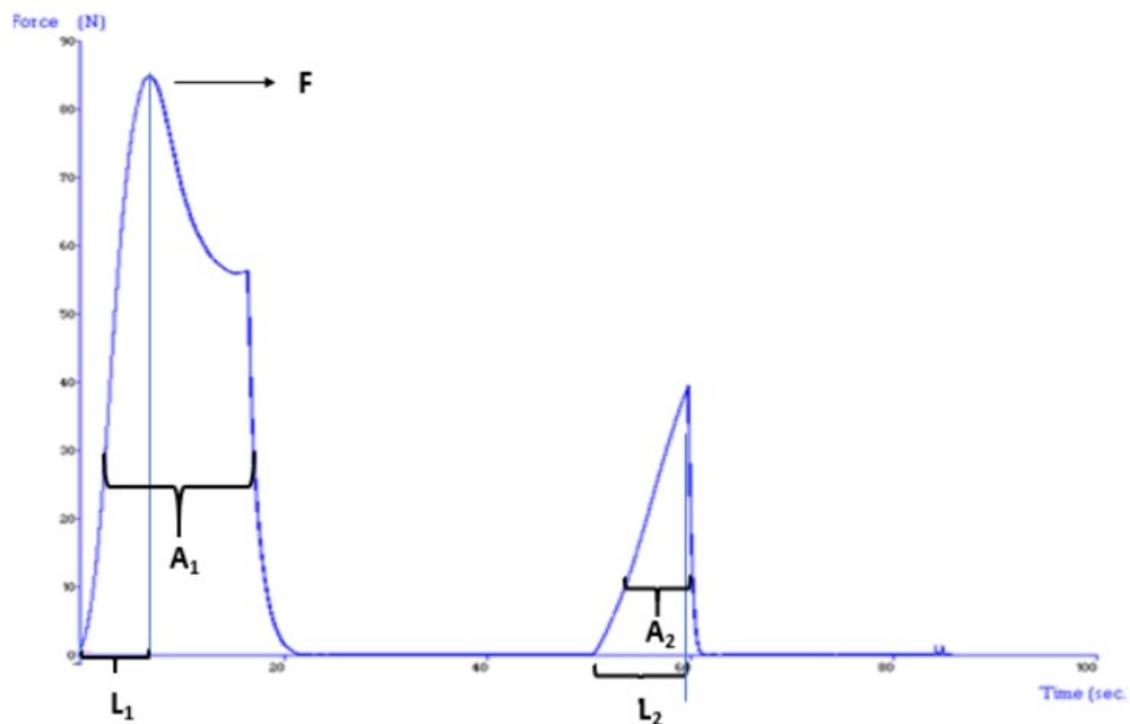


Figura 27. Esempio esplicativo di un grafico ottenuto da un test TPA effettuato su un campione di Parmigiano Reggiano ed i relativi parametri estrapolati.

I parametri più significativi che si ottengono dal grafico al fine di caratterizzare i campioni di Parmigiano analizzati da questa sperimentazione sono stati:

- Elasticità: Derivante dal rapporto tra L_2/L_1 , esprime la capacità di recuperare parte della struttura originaria, a seguito della prima decompressione e quindi a seguito della rimozione della forza applicata ed al suo conseguente rilassamento;

- Coesività: Rappresentata dal rapporto tra l'area delimitata dalla curva rappresentante la seconda compressione e l'area delimitata dalla curva rappresentante la prima compressione (A_2/A_1). Esso è un indice della resistenza del campione a seguito della prima deformazione prima che questo si rompa;
- Gommosità (N): È determinata dal prodotto della resistenza massima (F) per il valore della coesività (A_2/A_1), ed è uno degli attributi maggiormente utilizzati con lo scopo di descrivere le proprietà strutturali di questa gamma di prodotti, essendo strettamente correlata con la loro composizione, soprattutto per quanto riguarda il contenuto in grassi e il tempo di maturazione.

3.3.3 Test di Three Point Bending (TPB)

Al fine di effettuare un'ulteriore caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei campioni di Parmigiano Reggiano, è stato eseguito un *Three Point Bending Test* utilizzando una sonda *3-Point Bending Rig*. I due supporti regolabili del piatto di base dello strumento sono stati posti ad una distanza di 2 cm per sorreggere il campione. Il piatto di base è stato fissato nella piattaforma di lavoro e successivamente la lama dello strumento è stata collocata in una posizione tale che fosse equidistante dai due supporti inferiori del piatto di base. L'analisi è stata condotta fino alla rottura del campione, avente forma rettangolare con dimensioni pari a 6 x 2 x 2 cm *Figura 28*.

Le impostazioni che sono state utilizzate per l'analisi del Three Point Bending Test per campioni 2 x 2 cm sono riportate di seguito:

- Cella di carico: 25 kg;
- Calibrazione del probe 3 bending test: 40 mm e 100 g;
- Compressione: 10 mm;
- Velocità del test (discesa della sonda): 0.83 mm/s;
- 3 repliche per ogni campione.



Figura 28. Analisi di un test di Three Point Bending (TPB) effettuato su un campione di Parmigiano Reggiano.

Dal dinamogramma ottenuto con questo test *Figura 29*, sono stati estrapolati i seguenti parametri:

- Forza massima (N): Corrispondente al picco massimo della curva, rappresenta il punto massimo di flessione del campione prima che questo si rompa;
- Fratturabilità (1/mm): È identificata come la distanza in mm dal punto 0, nel quale si verifica la rottura del materiale in oggetto (nel caso in cui un campione preso in esame si rompesse ad una distanza ravvicinata dal punto 0 significherebbe che il materiale in oggetto presenta una fratturabilità elevata). I dati ottenuti sono stati riportati come (1/distanza) al fine di semplificare i dati del valore di fratturabilità. Valori elevati corrisponderanno così a campioni con elevata fratturabilità e quindi sensibili allo sforzo applicato.
- Distanza lineare (Ld): È un parametro calcolato tramite *il software Texture Expert Exceed (version 2.61, Stable Micro Systems)* dello strumento, tramite la seguente equazione:

$$L_d = \sum_{x=1}^{x=n} \sqrt{[F(x+1) - F(x)]^2 + [D(x+1) - D(x)]^2}$$

In cui F rappresenta la forza e D la distanza. Questa funzione è in grado di calcolare automaticamente la lunghezza del profilo del grafico, sommando le lunghezze dei segmenti

lineari che uniscono i punti acquisiti tra i tempi o le distanze selezionate. In questo caso un aumento di Ld ed una linea di grafico molto frastagliata, sono tipicamente associate alla presenza di un'elevata granulosità del prodotto.

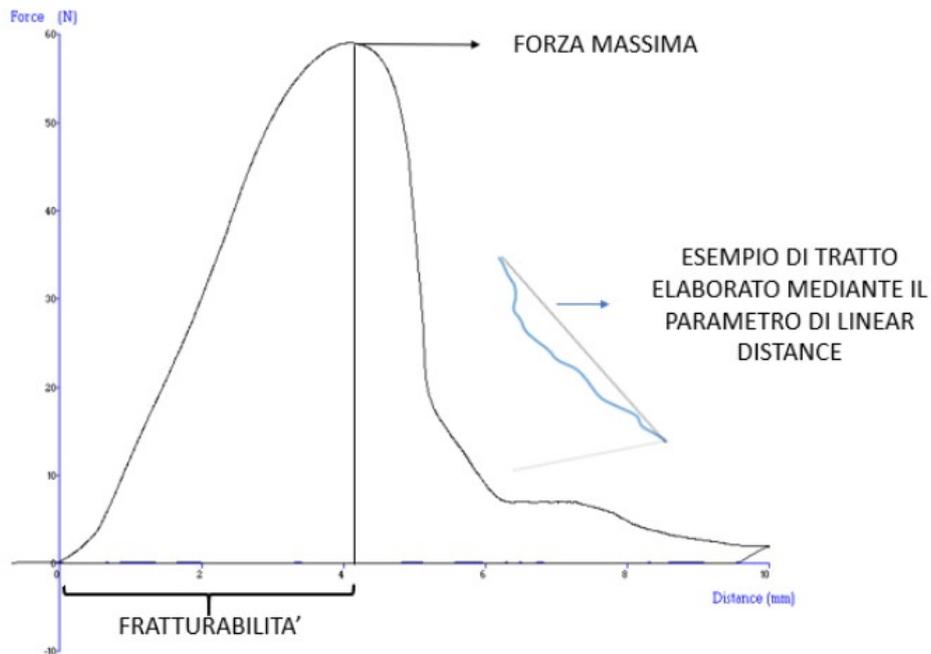


Figura 29. Esempio esplicativo di una curva tipica ottenuta da un test di Three Point Bending (TPB) effettuato su un campione di Parmigiano Reggiano.

3.4 Analisi di texture effettuate a diverse temperature

Al fine di verificare possibili differenze di texture, le analisi di Taglio, TPA e TPB sono state ripetute su campioni di Parmigiano Reggiano conservati a temperature differenti, in particolare sono state utilizzate le seguenti temperature di conservazione:

- 8°C,
- 20°C,
- 25°C,
- 30°C.

Queste temperature sono state impiegate per analizzare il comportamento dei campioni di Parmigiano Reggiano quando questi ultimi vengono sottoposti a delle forze esterne, ma soprattutto per valutare come le diverse temperature a cui i campioni sono sottoposti influiscono sul comportamento degli

stessi. A questo scopo i campioni sono stati formati diversamente a seconda dell'analisi, ricoperti con pellicola e condizionati a diverse temperature in termostati per 15 ore.

Per ogni campione e temperatura sono state effettuate tre ripetizioni.

3.5 Analisi statistica

I risultati ottenuti dalla sperimentazione condotta sono stati espressi come media \pm deviazione standard. Tutti i dati sono stati analizzati mediante l'analisi della varianza (ANOVA) one-way e il test post-hoc di Tukey con un livello di significatività di $p < 0,05$ al fine di rilevare differenze significative tra i campioni. Il software statistico utilizzato per l'analisi della varianza è stato: Statistica 8.0.

Capitolo 4 – Risultati e discussione

4.1 Attività dell'acqua

Nella *Tabella 9* sono riportati i valori di attività dell'acqua (a_w) della pasta dei vari campioni di Parmigiano Reggiano analizzati alla temperatura di 20°C. Le misurazioni dell' a_w sono state effettuate a temperatura ambiente. I valori di a_w sono risultati essere nel range compreso tra 0,864 e 0,897 rispettando i normali valori di un formaggio Parmigiano Reggiano stagionato dai 12 ai 24 mesi. Tutti i campioni hanno rispettato i requisiti di a_w del Parmigiano Reggiano previsti dal Disciplinare in quanto inferiori al limite definito a 0,920. In generale, a seguito di una maggiore stagionatura l' a_w tende a diminuire in quanto l'acqua residua si lega progressivamente in modo più stretto alla matrice organica del formaggio. Ad esempio, nello studio di Conte et al. (2021) che ha analizzato forme di Parmigiano Reggiano stagionate per 24, e 48 mesi, è stata evidenziata una riduzione dell' a_w nell'ordine PR24 ($0,877 \pm 0,002$) > PR48 ($0,858 \pm 0,003$) > PR84 ($0,828 \pm 0,002$). Da un punto di vista matematico l' a_w si può esprimere come il rapporto, ad una temperatura definita, tra la pressione di vapore dell'acqua in un prodotto (P_w) e la pressione di vapore dell'acqua pura (P_{w0}). Questo parametro viene misurato nel Parmigiano Reggiano perché è in grado di influenzare la risposta agli stress a cui i campioni vengono sottoposti durante le analisi di texture. Oltre a questo l'attività dell'acqua viene misurata al fine di capire quali possano essere i potenziali rischi di un alimento, sia a livello microbiologico che qualitativo, poiché è in grado di influenzare la cinetica di decadimento e di degradazione dello stesso (Piazza, 2006).

Tabella 9. Valori medi di attività dell'acqua (a_w) di campioni di Parmigiano Reggiano.

Campione	Attività dell'acqua (a_w)
GE1	0,878 ± 0,012 ^{A, bcdefg}
GE2	0,883 ± 0,006 ^{A, abcdefg}
GE3	0,876 ± 0,005 ^{A, cdefg}
GE4	0,884 ± 0,001 ^{A, abcdef}
GE5	0,886 ± 0,006 ^{A, abcdef}
GE6	0,887 ± 0,006 ^{A, abcdef}
GE7	0,878 ± 0,011 ^{A, bcdefg}
F1	0,895 ± 0,007 ^{A, abc}
F2	0,888 ± 0,010 ^{A, abcdef}
F3	0,897 ± 0,004 ^{A, ab}
F4	0,894 ± 0,005 ^{A, abcd}
F5	0,901 ± 0,004 ^{A, a}
F6	0,889 ± 0,004 ^{A, abcdef}
MAR1	0,885 ± 0,005 ^{A, abcdef}
MAR2	0,864 ± 0,009 ^{A, g}
MAG1	0,859 ± 0,010 ^{B, g}
MAG2	0,875 ± 0,002 ^{AB, cdefg}
MAG3	0,874 ± 0,002 ^{AB, efg}
MAG4	0,879 ± 0,009 ^{A, bcdefg}
MAG5	0,878 ± 0,003 ^{A, bcdefg}
GIU1	0,893 ± 0,004 ^{A, abcde}
GIU2	0,874 ± 0,004 ^{B, defg}
GIU3	0,873 ± 0,005 ^{B, fg}
GIU4	0,879 ± 0,004 ^{BC, bcdefg}
GIU5	0,889 ± 0,001 ^{AC, abcdef}
GIU6	0,893 ± 0,007 ^{A, abcde}
GIU7	0,894 ± 0,001 ^{A, abcde}

Lettere maiuscole diverse nella stessa colonna indicano differenze significative tra i campioni dello stesso mese e lettere minuscole diverse nella stessa colonna indicano differenze significative tra tutti i campioni secondo il confronto multiplo post-hoc di Tukey ($p < 0,05$).

4.2 Taglio

Tabella 10. Valori medi di durezza (N) di campioni di Parmigiano Reggiano determinati con il test di taglio.

Campione	Durezza (N)
GE1	8,21 ± 1,22 ^{A, a}
GE2	6,89 ± 1,66 ^{A, a}
GE3	8,31 ± 0,89 ^{A, a}
GE4	6,47 ± 0,65 ^{A, a}
GE5	7,78 ± 1,04 ^{A, a}
GE6	5,86 ± 0,39 ^{A, a}
GE7	7,29 ± 1,26 ^{A, a}
F1	7,72 ± 0,53 ^{A, a}
F2	6,45 ± 0,50 ^{A, a}
F3	7,01 ± 0,38 ^{A, a}
F4	7,03 ± 0,58 ^{A, a}
F5	6,89 ± 0,48 ^{A, a}
F6	6,61 ± 0,69 ^{A, a}
MAR1	6,21 ± 0,67 ^{A, a}
MAR2	6,82 ± 1,59 ^{A, a}
MAG1	7,85 ± 1,42 ^{A, a}
MAG2	8,31 ± 1,12 ^{A, a}
MAG3	7,48 ± 0,95 ^{A, a}
MAG4	5,45 ± 1,00 ^{A, a}
MAG5	6,41 ± 1,76 ^{A, a}
GIU1	6,83 ± 0,92 ^{A, a}
GIU2	7,40 ± 0,95 ^{A, a}
GIU3	5,99 ± 1,13 ^{A, a}
GIU4	7,36 ± 0,95 ^{A, a}
GIU5	7,28 ± 1,12 ^{A, a}
GIU6	5,80 ± 0,63 ^{A, a}
GIU7	6,92 ± 0,97 ^{A, a}

Lettere maiuscole diverse nella stessa colonna indicano differenze significative tra i campioni dello stesso mese e lettere minuscole diverse nella stessa colonna indicano differenze significative tra tutti i campioni secondo il confronto multiplo post-hoc di Tukey ($p < 0,05$).

Nell'analisi di Taglio del Parmigiano Reggiano è stato valutato il parametro della durezza espresso in Newton (N) e corrispondente alla forma massima di taglio determinata. I valori di durezza ottenuti dall'analisi e riportati nella *Tabella 10* evidenziano come questi ultimi si aggirino intorno ai valori di 5,45 e 8,31 N, rispettivamente quello più basso e più alto registrati. Tuttavia, secondo l'analisi statistica effettuata non sono state rilevate differenze significative tra i campioni analizzati. Valori medi di massima forza di taglio significativamente più elevati, pari a circa 17 N, sono stati riportati dalla ricerca di Romani et al. (2002). La differenza dei risultati può essere attribuita al fatto che le diverse forme di Parmigiano Reggiano sono state analizzate utilizzando il tipico coltello dalla lama corta e appuntita e dalla foggia a mandorla come lama, mentre nel presente studio è stata utilizzata una lama in acciaio sottile.

4.4 Texture Profile Analysis (TPA)

Tabella 11. Valori medi di elasticità, coesività e gommosità di campioni di Parmigiano Reggiano determinati con il Texture Profile Analysis (TPA) test.

Campione	Elasticità	Coesività	Gommosità
GE1	1,43 ± 0,22 ^{A, ab}	0,13 ± 0,02 ^{A, cdef}	21,70 ± 0,48 ^{A, a}
GE2	1,41 ± 0,02 ^{A, ab}	0,11 ± 0,10 ^{A, def}	11,59 ± 1,02 ^{BCD, fg}
GE3	1,46 ± 0,00 ^{A, ab}	0,10 ± 0,02 ^{A, def}	10,23 ± 2,75 ^{D, fg}
GE4	1,48 ± 0,17 ^{A, ab}	0,11 ± 0,01 ^{A, def}	14,45 ± 1,03 ^{BC, cdefg}
GE5	1,61 ± 0,25 ^{A, ab}	0,10 ± 0,01 ^{A, ef}	10,78 ± 1,73 ^{CD, fg}
GE6	1,58 ± 0,18 ^{A, ab}	0,12 ± 0,02 ^{A, cdef}	12,55 ± 2,11 ^{BCD, efg}
GE7	1,55 ± 0,21 ^{A, ab}	0,12 ± 0,02 ^{A, cdef}	15,44 ± 1,19 ^{B, bcdef}
F1	1,56 ± 0,31 ^{AB, ab}	0,11 ± 0,02 ^{BC, def}	13,61 ± 2,52 ^{CD, defg}
F2	1,33 ± 0,16 ^{AB, ab}	0,13 ± 0,01 ^{AB, bcdef}	14,76 ± 1,57 ^{BC, cdefg}
F3	1,41 ± 0,18 ^{AB, ab}	0,11 ± 0,01 ^{BC, def}	11,62 ± 0,79 ^{CD, fg}
F4	1,71 ± 0,26 ^{A, a}	0,09 ± 0,01 ^{C, f}	10,10 ± 0,70 ^{D, g}
F5	1,48 ± 0,10 ^{AB, ab}	0,15 ± 0,02 ^{A, abc}	20,46 ± 2,17 ^{A, ab}
F6	1,18 ± 0,07 ^{B, ab}	0,15 ± 0,01 ^{A, abc}	18,89 ± 0,85 ^{AB, abc}
MAR1	1,20 ± 0,54 ^{A, ab}	0,13 ± 0,02 ^{A, bcdef}	11,95 ± 1,44 ^{A, fg}
MAR2	1,39 ± 0,16 ^{A, ab}	0,14 ± 0,01 ^{A, abc}	11,19 ± 2,42 ^{A, fg}
MAG1	1,50 ± 0,20 ^{A, ab}	0,14 ± 0,01 ^{A, abcde}	9,16 ± 1,06 ^{B, g}
MAG2	1,53 ± 0,15 ^{A, ab}	0,15 ± 0,01 ^{A, abc}	10,99 ± 2,34 ^{B, fg}
MAG3	1,51 ± 0,18 ^{A, ab}	0,15 ± 0,01 ^{A, abc}	11,46 ± 1,16 ^{AB, fg}
MAG4	1,00 ± 0,38 ^{A, b}	0,15 ± 0,01 ^{A, abc}	15,27 ± 1,06 ^{A, cdef}
MAG5	1,29 ± 0,20 ^{A, ab}	0,15 ± 0,02 ^{A, abc}	15,54 ± 1,87 ^{A, bcdef}
GIU1	1,47 ± 0,33 ^{A, ab}	0,14 ± 0,01 ^{C, abcd}	12,55 ± 1,97 ^{C, efg}
GIU2	0,99 ± 0,13 ^{A, b}	0,21 ± 0,03 ^{A, a}	16,91 ± 1,71 ^{AB, abcde}
GIU3	1,11 ± 0,43 ^{A, ab}	0,17 ± 0,01 ^{ABC, ab}	13,11 ± 1,36 ^{BC, defg}
GIU4	1,20 ± 0,12 ^{A, ab}	0,14 ± 0,01 ^{C, bcdef}	15,83 ± 2,83 ^{ABC, bcde}
GIU5	1,05 ± 0,12 ^{A, b}	0,18 ± 0,01 ^{AB, a}	17,54 ± 1,01 ^{A, abcd}
GIU6	1,35 ± 0,23 ^{A, ab}	0,16 ± 0,02 ^{BC, abc}	14,95 ± 0,88 ^{ABC, cdef}
GIU7	1,12 ± 0,44 ^{A, ab}	0,15 ± 0,02 ^{BC, abc}	13,02 ± 2,72 ^{BC, efg}

Lettere maiuscole diverse nella stessa colonna indicano differenze significative tra i campioni dello stesso mese e lettere minuscole diverse nella stessa colonna indicano differenze significative tra tutti i campioni secondo il confronto multiplo post-hoc di Tukey ($p < 0,05$).

L'analisi di TPA è stata utilizzata in questa sperimentazione per determinare, come riportato nella *Tabella 11*, i valori di Elasticità, Gommosità e Coesività al fine di valutare il comportamento dei campioni di Parmigiano Reggiano quando questi vengono sottoposti a una doppia compressione. I bassi valori di elasticità e coesività spiegano la peculiare fragilità dei campioni di formaggio Parmigiano Reggiano (Romani et al., 2002). Infatti, dopo la prima compressione i campioni subiscono un elevato stress di deformazione e presentano una bassa tendenza a ritornare alla loro forma originale e una bassa resistenza alla deformazione. Nei campioni analizzati a febbraio (F1-F6) e a giugno (GIU1-GIU7) sono state rilevate delle differenze significative tra i campioni in termini di elasticità e coesività, mentre negli altri campionati negli altri mesi non hanno presentato delle differenze significative. Per quanto riguarda i dati ottenuti per la gommosità, questi ultimi risultano più alti rispetto ai parametri precedenti e si sono registrate maggiori differenze significative tra i vari campioni analizzati.

4.5 Three Point Bending (TPB)

Tabella 12. Valori medi di forza massima (N), distanza lineare e fratturabilità (1/mm) di campioni di parmigiano determinati con il Three Point Bending (TPB) test.

Campione	Forza massima (N)	Distanza lineare	Fratturabilità (1/mm)
GE1	49,61 ± 15,74 ^{A, ab}	98,94 ± 34,13 ^{A, abc}	0,22 ± 0,07 ^{B, abc}
GE2	37,75 ± 1,77 ^{A, bcdef}	71,96 ± 9,68 ^{A, c}	0,25 ± 0,04 ^{AB, abc}
GE3	47,17 ± 1,29 ^{A, abc}	97,52 ± 0,35 ^{A, abc}	0,33 ± 0,03 ^{A, a}
GE4	53,93 ± 1,86 ^{A, a}	104,55 ± 5,48 ^{A, ab}	0,25 ± 0,03 ^{AB, abc}
GE5	42,22 ± 0,87 ^{A, abcdef}	84,81 ± 5,94 ^{A, bc}	0,27 ± 0,02 ^{AB, abc}
GE6	42,06 ± 5,67 ^{A, abcd}	87,35 ± 12,51 ^{A, abc}	0,28 ± 0,03 ^{AB, abc}
GE7	40,29 ± 5,85 ^{A, abcdef}	77,52 ± 8,87 ^{A, bc}	0,28 ± 0,04 ^{AB, abc}
F1	48,07 ± 2,46 ^{AB, abc}	95,30 ± 6,03 ^{A, abc}	0,28 ± 0,09 ^{A, abc}
F2	51,10 ± 0,85 ^{AB, ab}	103,79 ± 1,79 ^{A, ab}	0,24 ± 0,04 ^{A, abc}
F3	43,37 ± 1,39 ^{A, abcd}	89,27 ± 3,31 ^{A, abc}	0,29 ± 0,02 ^{A, abc}
F4	47,71 ± 1,63 ^{AB, abc}	103,87 ± 3,11 ^{A, ab}	0,29 ± 0,05 ^{A, abc}
F5	54,77 ± 2,96 ^{B, a}	107,80 ± 5,10 ^{A, ab}	0,22 ± 0,02 ^{A, bc}
F6	54,97 ± 7,47 ^{B, a}	109,09 ± 16,23 ^{A, ab}	0,30 ± 0,07 ^{A, ab}
MAR1	31,91 ± 1,91 ^{A, cdef}	101,08 ± 5,27 ^{A, abc}	0,23 ± 0,05 ^{A, abc}
MAR2	31,49 ± 5,11 ^{A, def}	90,76 ± 13,53 ^{A, abc}	0,23 ± 0,03 ^{A, abc}
MAG1	26,58 ± 1,63 ^{B, ef}	85,88 ± 2,83 ^{A, bc}	0,19 ± 0,02 ^{A, bc}
MAG2	25,82 ± 4,93 ^{B, f}	83,15 ± 8,42 ^{B, bc}	0,20 ± 0,03 ^{A, bc}
MAG3	29,61 ± 2,99 ^{B, def}	89,66 ± 7,40 ^{B, abc}	0,23 ± 0,03 ^{A, abc}
MAG4	30,15 ± 3,33 ^{B, def}	97,47 ± 8,42 ^{B, abc}	0,21 ± 0,02 ^{A, bc}
MAG5	41,43 ± 2,20 ^{A, abcde}	118,91 ± 10,75 ^{A, a}	0,23 ± 0,02 ^{A, abc}
GIU1	33,76 ± 7,36 ^{A, cdef}	99,22 ± 13,04 ^{AB, abc}	0,18 ± 0,04 ^{A, c}
GIU2	31,40 ± 2,14 ^{A, def}	85,78 ± 6,31 ^{B, bc}	0,20 ± 0,01 ^{A, bc}
GIU3	28,71 ± 0,79 ^{A, def}	92,58 ± 3,13 ^{B, abc}	0,17 ± 0,04 ^{A, c}
GIU4	42,12 ± 12,32 ^{A, abcd}	120,28 ± 20,37 ^{A, a}	0,17 ± 0,05 ^{A, c}
GIU5	33,33 ± 6,42 ^{A, cdef}	105,47 ± 16,97 ^{AB, ab}	0,24 ± 0,06 ^{A, abc}
GIU6	31,08 ± 1,38 ^{A, def}	98,72 ± 3,51 ^{AB, abc}	0,21 ± 0,03 ^{A, bc}
GIU7	33,52 ± 3,59 ^{A, cdef}	99,86 ± 7,88 ^{AB, abc}	0,24 ± 0,04 ^{A, abc}

Lettere maiuscole diverse nella stessa colonna indicano differenze significative tra i campioni dello stesso mese e lettere minuscole diverse nella stessa colonna indicano differenze significative tra tutti i campioni secondo il confronto multiplo post-hoc di Tukey ($p < 0,05$).

La *Tabella 12* riporta i dati relativi alla forza massima alla distanza lineare e alla fratturabilità determinati con il test TPB. I risultati ottenuti mostrano come i valori della forza massima variano in un range molto ampio compreso tra 25,82 e 54,97 N. L'analisi statistica ha inoltre evidenziato differenze significative tra i campioni, soprattutto confrontandoli tra le mensilità di campionatura. I valori di forza massima determinati con il test TPB indicano la forza di resistenza del campione che non riuscendo più ad opporre resistenza si rompe. Per quanto riguarda i dati di distanza lineare e quelli di fratturabilità sono state rilevate differenze significative tra i campioni ma di minore entità, indicando una maggiore omogeneità dei campioni. I campioni che riportano valori elevati corrispondono a campioni più fratturabili; poiché questo parametro è stato riportato come 1/mm; in quanto, una distanza in mm elevata, corrisponde a campioni che presentano una bassa fratturabilità.

4.6 Analisi di texture a diverse temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C

4.6.1 Taglio a diverse temperature

Nella *Figura 30* sono mostrati i valori di durezza (N) determinati con il test di taglio sul campione di Parmigiano Reggiano MAG 3 condizionato a diverse temperature.

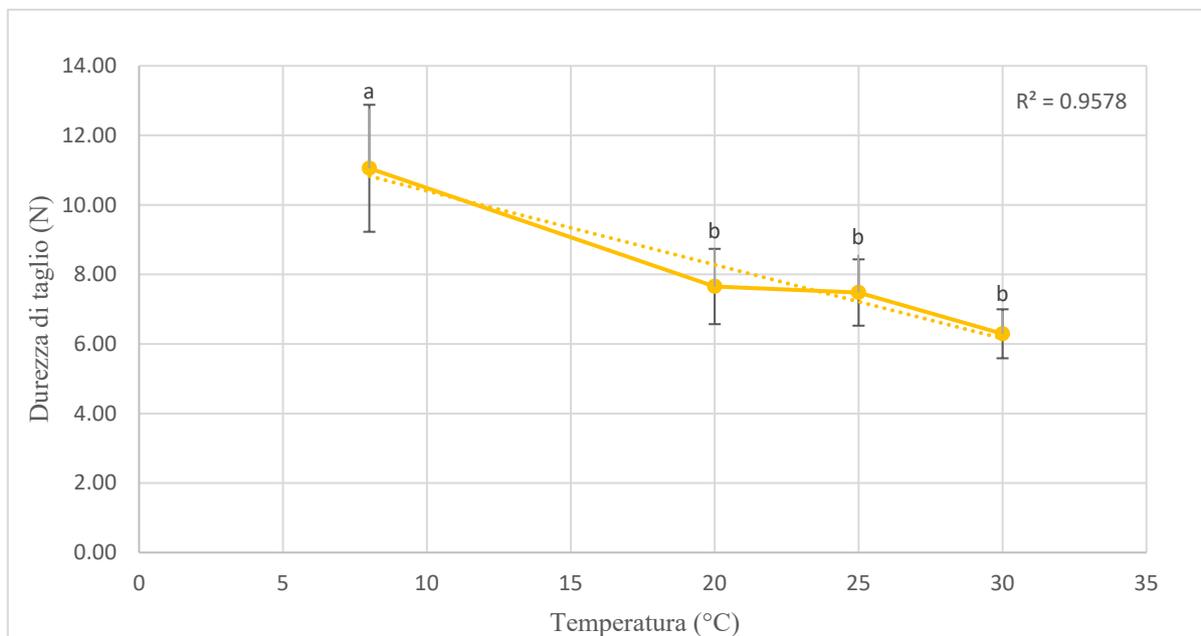


Figura 30. Durezza di taglio (N) misurata durante il test di taglio effettuato su campioni di Parmigiano Reggiano a diverse temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C.

Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra i campioni.

Dal grafico mostrato in *Figura 30* possiamo notare che il test di taglio effettuato sui campioni di Parmigiano Reggiano ha un andamento differente a seconda delle temperature di condizionamento, con valori di durezza (N) diversi da campione a campione. In maniera particolare possiamo affermare che ad un aumento della temperatura di condizionamento, la forza necessaria per il taglio dei campioni diminuisce con un andamento lineare ($R^2 = 0,96$). Quindi, la forza che il campione di Parmigiano è in grado di sopportare prima che esso si rompa è inferiore quando le temperature in cui esso è condizionato sono più alte. Rispettivamente alle temperature di 8, 20,25 e 30°C la durezza media di taglio è stata di 11,05 ; 7,65 ; 7,48 e 6,29. Questa minore resistenza può essere dovuta a cambiamenti strutturali che avvengono nella pasta di formaggio Parmigiano Reggiano, in particolare modifiche nella frazione lipidica, proteica e nel contenuto di acqua. Tuttavia, non sono state registrate delle differenze significative tra i campioni condizionati alle temperature più elevate di 20, 25 e 30°C.

4.6.2 Texture Profile Analysis (TPA) a diverse temperature

Nella *Figura 31* sono mostrati i valori di durezza (N) alla compressione determinati con il test TPA sul campione di Parmigiano Reggiano MAG 1 condizionato a diverse temperature. In dettaglio sono stati misurati valori medi di 210,23 ; 100,28 ; 66,24 e 53,69 rispettivamente nei campioni condizionati alle temperature di 8, 20, 25 e 30°C.

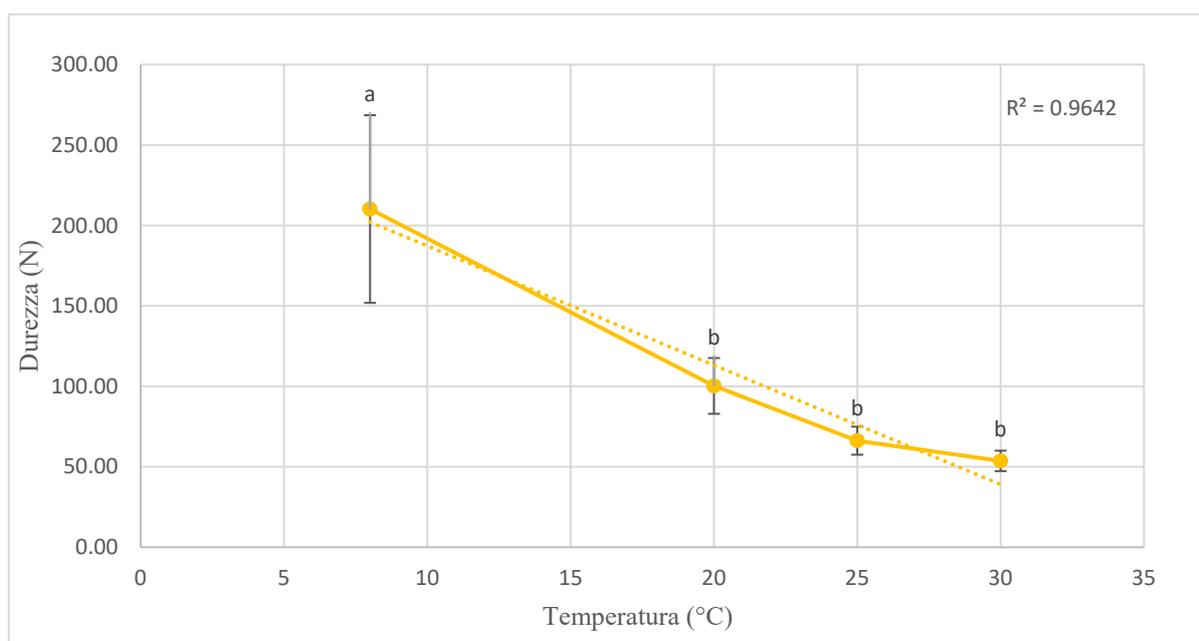


Figura 31. Forza (N) misurata durante il test di TPA effettuato su campioni di Parmigiano Reggiano conservato a diverse temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C.

Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra i campioni.

I presenti valori della durezza (N) sono relativi al picco massimo del primo ciclo di compressione che causa la deformazione dei campioni. Similarmente ai valori di durezza di taglio, viene evidenziato che l'aumento delle temperature dei campioni di Parmigiano Reggiano influiscono sul comportamento strutturale degli stessi quando sottoposti ad un test di compressione. In modo particolare si nota come le elevate temperature portino ad una minore resistenza dei campioni e come la forza necessaria prima che questi ultimi si deformino sia significativamente inferiore per quanto riguarda quelli che vengono conservati a temperature più basse di 8°C.

In *Figura 32* sono mostrati i valori medi di elasticità ottenuti dall'analisi TPA su campioni di Parmigiano Reggiano MAG1 condizionati a diverse temperature.

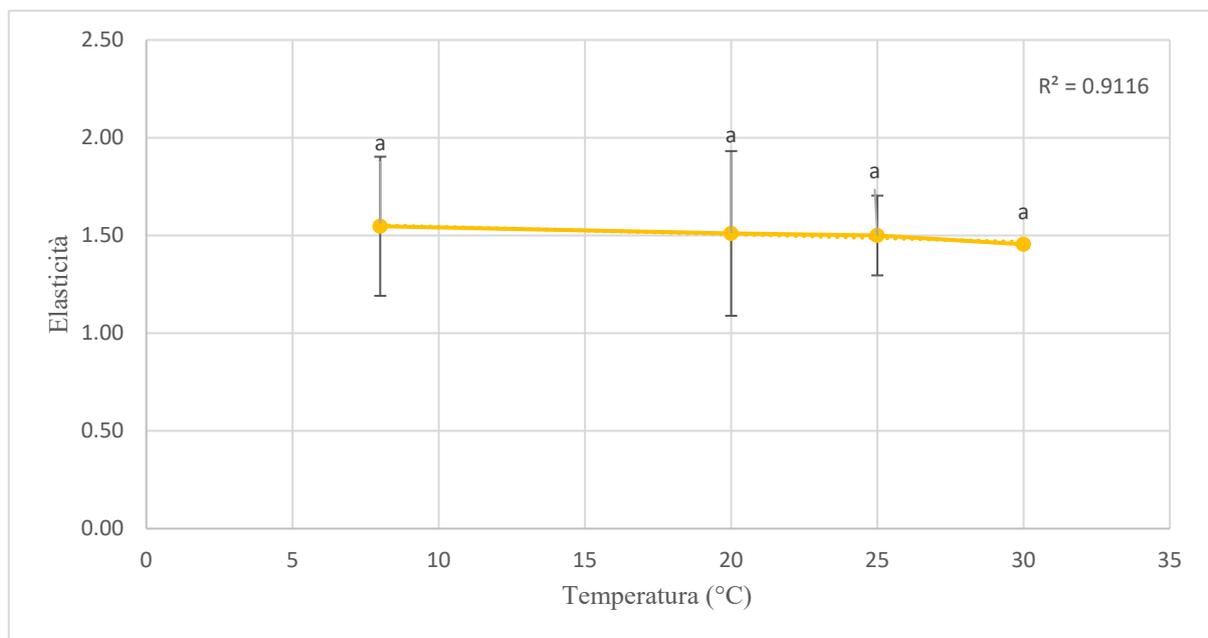


Figura 32. Elasticità ottenuta dal test di TPA effettuato su campioni di Parmigiano Reggiano conservati a differenti temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C.

Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra i campioni.

I valori medi di elasticità sono risultati pari a 1,55 ; 1,51 ; 1,50 e 1,45 rispettivamente alle temperature di 8, 20, 25 e 30°C. Questi dati indicano come le diverse temperature di condizionamento dei campioni di Parmigiano Reggiano influiscono minimamente sul comportamento dei campioni e quindi sulla capacità che questi hanno di recuperare parte della loro struttura originaria.

I valori di coesività ottenuti dall'analisi TPA sono mostrati nella *Figura 33*, analisi effettuata su campioni di Parmigiano Reggiano MAG1 condizionati a diverse temperature. I valori medi di coesività sono risultati pari a 0,06 ; 0,14 ; 0,14 e 0,17 rispettivamente alle temperature di 8, 20, 25 e 30°C.

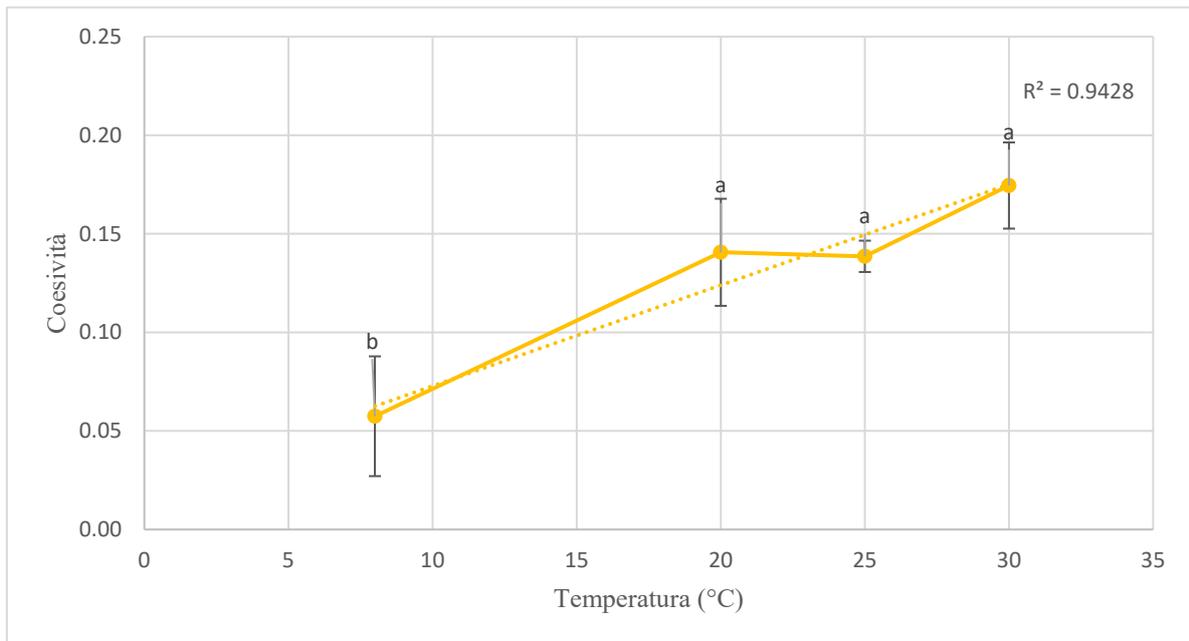


Figura 33. Coesività ottenuta dal test di TPA effettuato su campioni di Parmigiano Reggiano conservati a differenti temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C.

Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra i campioni.

La coesività, ovvero il rapporto delle aree relative alla prima e seconda compressione ($A2/A1$), fornisce indicazioni riguardo il comportamento del campione durante la prima deformazione e come quest'ultimo sia in grado di sopportare una seconda compressione. Dalla *Figura 33* notiamo come i valori di coesività sono significativamente più elevati nei campioni di Parmigiano Reggiano condizionati alle temperature di 20, 25 e 30°C rispetto a quelli condizionati a 8°C. Possiamo quindi affermare che dai dati presenti nel grafico, la resistenza del campione in seguito ai due cicli dinamometrici è più alta nei campioni che sono stati condizionati a temperature più alte. Alle rispettive temperature di 8, 20, 25 e 30°C sono stati misurati i seguenti valori di coesività medi 0,06 ; 0,014 ; 0,014 e 0,17.

In *Figura 34* sono mostrati i valori inerenti alla gommosità ottenuti mediante l'analisi di TPA su campioni di Parmigiano Reggiano MAG 1 temperati a diverse temperature. I valori medi di gommosità registrati sono pari a 9,46 ; 11,28 ; 9,16 e 9,43 rispettivamente alle temperature di 8,20,25 e 30°C.

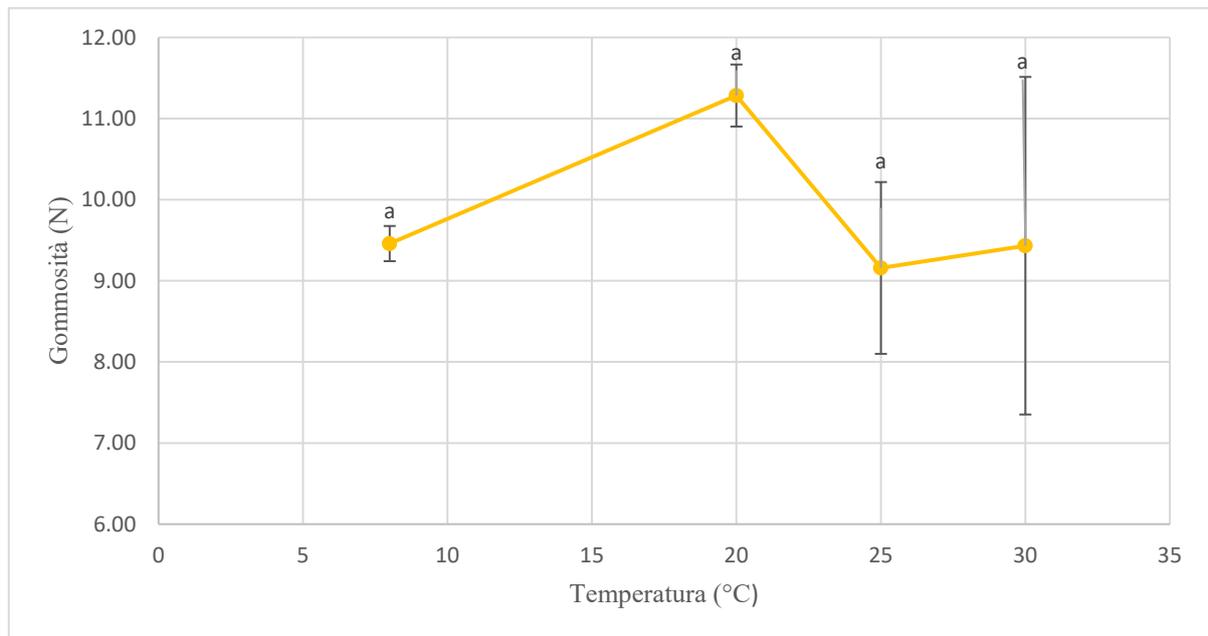


Figura 34. Gommosità ottenuta dal test di TPA effettuato su campioni di Parmigiano Reggiano conservati a diverse temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C.

Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra i campioni.

La gommosità è un parametro determinato dal prodotto tra la durezza (N) e il valore della coesività. È un attributo che si applica su prodotti semisolidi come in questo caso il Parmigiano Reggiano. I valori inerenti alla gommosità dei campioni di Parmigiano sembrano non avere un comportamento differente a seconda delle diverse temperature di condizionamento in quanto non sono state determinate delle differenze significative tra i campioni.

4.6.3 Three Point Bending (TPB) a diverse temperature

Nella *Figura 35* sono riportati i dati della durezza (N) determinati mediante l'analisi TPB effettuata su campioni di Parmigiano Reggiano MAG2 condizionati a diverse temperature.

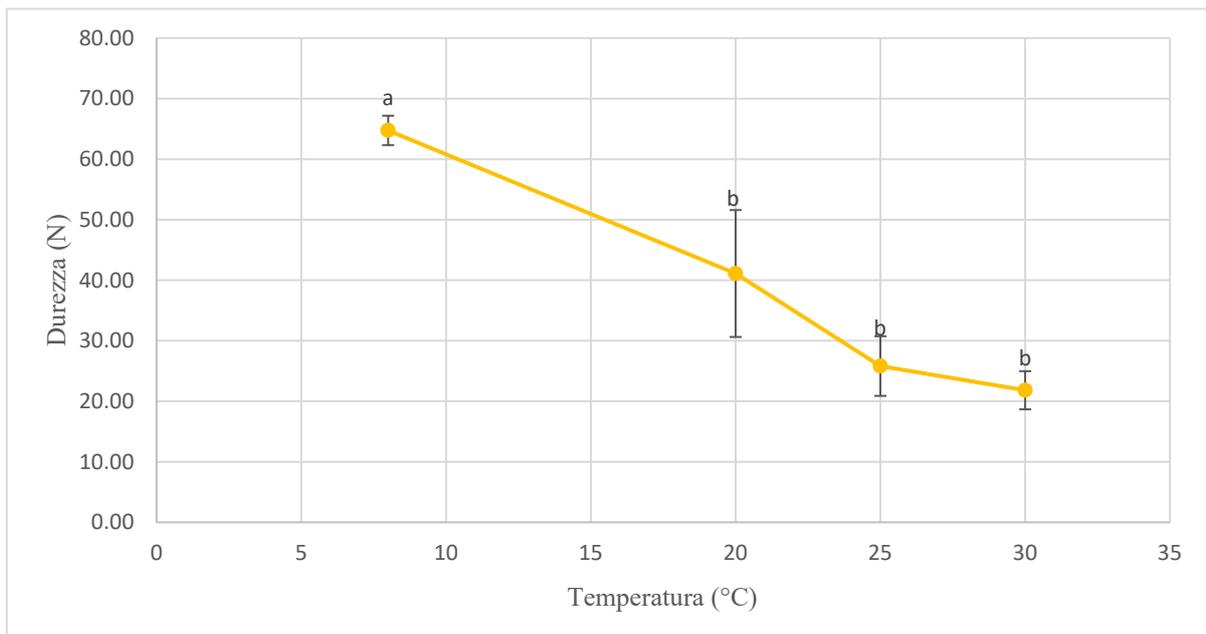


Figura 35. Durezza in (N) misurata durante il test di TPB effettuato su campioni di Parmigiano Reggiano condizionati a diverse temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C.

Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra i campioni.

La durezza misurata con il test TPB rappresenta il punto massimo di flessione del campione di Parmigiano Reggiano prima che quest'ultimo si rompa. In particolare, i valori medi di durezza (N) determinati con questo test sono risultati essere pari a 64,74 ; 41,11 ; 25,82 e 21,82 rispettivamente per le temperature di 8,20,25 e 30°C. I valori della durezza calano progressivamente con l'aumentare delle temperature di conservazione dei campioni e come quindi la forza che questi ultimi oppongono allo stress di deformazione diminuisce. Ancora una volta le differenze sono risultate significative solo tra i campioni conservati a 8 gradi rispetto a quelli che sono stati conservati a più alte temperature. Questo comportamento può essere correlato ai cambiamenti micro e macro-strutturali che avvengono all'interno dei campioni di Parmigiano. In particolare, la minore resistenza che oppongono i campioni alle elevate temperature può essere dovuta a modificazioni del contenuto lipidico, del contenuto di acqua e alla minor coesione del materiale analizzato.

In *Figura 36* sono riportati i valori della fratturabilità espressa come 1/mm durante l'analisi TPB effettuata su campioni di Parmigiano Reggiano MAG2 condizionati a diverse temperature.

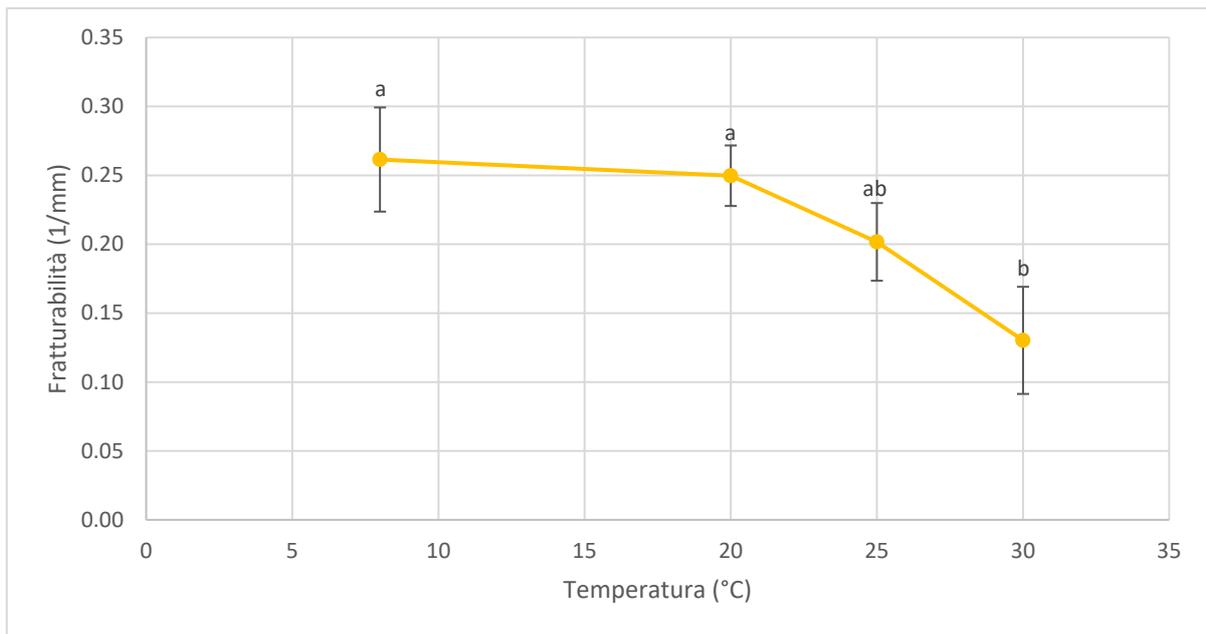


Figura 36. Fratturabilità (1/mm) misurata durante il test di TPB effettuato su campioni di Parmigiano Reggiano condizionati a diverse temperature: 8°C, 20°C, 25°C e 30°C.

Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra i campioni.

I valori della fratturabilità indicano la distanza alla quale si verifica la rottura del campione. Si può notare che la fratturabilità dei campioni di formaggio sia variata leggermente nell'intervallo di temperature di 8°C e 20°C e come invece superati i 20°C i valori della fratturabilità diminuiscano significativamente per i campioni condizionati alle temperature di 25 e 30°C. Quindi possiamo affermare che le temperature a cui viene effettuato il test TPB sono in grado di condizionare il comportamento dei campioni di Parmigiano Reggiano, in maniera particolare i campioni sono più suscettibili a rompersi e fratturarsi a basse temperature mentre quando le temperature sono alte i campioni mostrano una maggiore resistenza alla rottura e di conseguenza bassi valori di fratturabilità.

Capitolo 5 – Conclusioni

Dal complesso dei risultati emersi dal presente lavoro di ricerca è possibile concludere che i campioni di Parmigiano Reggiano provenienti da diversi caseifici hanno presentato alcune differenze significative in termini di attività dell'acqua, durezza di taglio, elasticità, coesività, gommosità, forza massima, distanza lineare e fratturabilità. Queste variabilità potrebbero essere attribuite a diversità e peculiarità nel processo produttivo e nell'esperienza dei singoli caseari oltre che dall'alimentazione delle bovine e dalle peculiarità del latte impiegato per la produzione del formaggio. Inoltre, è stato evidenziato un ruolo significativo delle temperature dei campioni alla quale si effettuano le analisi di texture. In particolare, i campioni condizionati a 8°C, rispetto a quelli condizionati a 20, 25 e 30°C, hanno presentato differenze significative in tutti i parametri di texture analizzati. Solamente l'elasticità e la gommosità, determinate con il test TPA, non hanno presentato delle differenze significative indicando che le diverse temperature di condizionamento dei campioni di Parmigiano Reggiano influiscono minimamente sulla capacità che questi hanno di recuperare parte della loro struttura originaria. Queste analisi possono essere in grado di fornire delle indicazioni per quanto riguarda le temperature ottimali e consigliate per poter apprezzare a pieno le caratteristiche del Parmigiano Reggiano durante il consumo.

Bibliografia

- A. Summer, P. Franceschi, P. Formaggioni, M. Malacarne (2015). Influence of milk somatic cell content on Parmigiano-Reggiano cheese yield. *Journal Dairy Research*, 82: 222-227.
- Arsenio L. and Strata, A. (1995). *Alimentazione ed esercizio fisico*, Barilla G. e R.F.lli, R.F., Parma, Italy.
- Bartolini L. (1999). “Il Parmigiano Reggiano, Antica sapienza e fragranti profumi nella saporita “grana” del principe dei formaggi”. Nardini editore. ISBN 88-404-5225-7.
- Bourne M. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. 2nd ed. New York: Academic Press.
- C. Le Maréchal, R. Thiéry, E. Vautor, Y. Le Loir (2011). Mastitis impact on technological properties of milk and quality of milk products - a review *Dairy Science and Technology*, 91: 247-282.
- Commissione Europea (2006). REGOLAMENTO (CE) N. 510/2006 DEL CONSIGLIO del 20 marzo 2006 relativo alla protezione delle indicazioni geografiche e delle denominazioni di origine dei prodotti agricoli e alimentari. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, L, 93, 12–25.
- Commissione Europea (2018). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* C 132/17DOCUMENTO UNICO «PARMIGIANO REGGIANO» N. UE: PDO-IT-02202 – 14.11.2016 DOP (X) IGP ().
- Consorzio del formaggio Parmigiano Reggiano (2007). *Acquisizioni relative al valore nutrizionale del Parmigiano Reggiano*.
- Corradini C. (1995). *Chimica e tecnologia del latte*, Edizione Tecniche Nuove, Milano. ISBN: 8848100058.
- Cozzi, E., Donati, M., Mancini, M., Guareschi, M., Veneziani, M. (2019). PDO Parmigiano Reggiano Cheese in Italy. In: Arfini, F., Bellassen, V. (eds) *Sustainability of European Food Quality Schemes*. Springer.
- Fox, P.F., Guinee, T.P., Cogan, T.M., McSweeney, P.L.H. (2017). *Cheese: Structure, Rheology and Texture*. In: *Fundamentals of Cheese Science*. Springer, Boston, MA.
- Franchini I. (2019). *Il Parmigiano Reggiano tra tradizione e innovazione*. Youcanprint editore. ISBN 9788831615099.
- Garini L., Verduci E., Scaglioni, S., and Bernasconi, S. (2007). *Nutrizione in età evolutiva. Aggiornamento sugli aspetti nutrizionali del Parmigiano Reggiano*.
- *Gazzetta Ufficiale* (2006-2008-2010). *Disciplinare di produzione del formaggio Parmigiano-Reggiano, Regolamento di alimentazione delle bovine*.

- Giacomini, C., Arfini, F., & de Roest, K. (2011/12). Interprofessione e prodotti tipici: Il caso del Parmigiano Reggiano. *Sviluppo Locale XV*, 37-38 , 125–150.
- INRAN (2008), Dossier, il Parmigiano Reggiano, un prodotto naturalmente funzionale, Milano.
- Iotti M. (1991). Storia del formaggio di grana “Parmigiano Reggiano”, Aedes Muratoriana, Modena 1991.
- Jimeno J., Lazaro M.J., Sollberger H. (1995). Antagonistic interactions between propionic acid bacteria and non-starter lactic acid bacteria, *Lait* 75 401–413.
- Kees de Roest (2000). The Production of Parmigiano-Reggiano Cheese: The force of an artisanal system in an industrialised world. Edition: European Perspectives on Rural Development Publisher: Van Gorcum, Assen, the Netherlands Editor: Wageningen University ISBN: 9023236513.
- Massimo Malacarne, Andrea Summer, Giorgio Panari, Mauro Pecorari, Primo Mariani (2006). Caratterizzazione chimico-fisica della maturazione del Parmigiano-Reggiano., *Scienza e Tecnica Lattiero Casearia*, 57 (4), 215-228.
- McSweeney PHL, Sousa MJ (2000) *Lait* 80: 293–324.
- McSweeney PLH, Fox PF (1993). Cheese: methods of chemical analysis. In “Cheese: chemistry, physics and microbiology”, second edition, Vol 2, 341- 388. Ed PF Fox. Chapman & Hall, London.
- MIPAAF, Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali. (2018). Disciplinary Parmigiano Reggiano.
- Mohidus Samad Khan, Mohammad Shafiur Rahman (2021). *Techniques to Measure Food Safety and Quality* Springer Cham.
- Noel, Y., Zannoni, M., Hunter, EA. (1996). Texture of Parmigiano Reggiano cheese: Statistical relationships between rheological and sensory variates, *Volume 76, Issue 3, Page 243-254*.
- P. C. B. Vianna, G. Mazal, M. V. Santos, H. M. A. Bolini, M. L. Gigante (2008). Microbial and sensory changes throughout the ripening of Prato cheese made from milk with different levels of somatic cells. *Journal of Dairy Science*, 91: 1743-1750.
- Pellegrino Conte, Luciano Cinquanta, Paolo Lo Meo, Francesca Mazza, Onofrio Corona (2021). Fast field cycling NMR relaxometry as a tool to monitor Parmigiano cheese ripening. *Food Research International*, 139: 109845.
- Piazza Laura (2006). Ruolo dell’acqua nel decadimento della qualità degli alimenti. In: *Convegno AISSA: Il pianeta acqua nel continente agricoltura*. AISSA, p. 27.
- Piero Franceschi, Massimo Malacarne, Paolo Formaggioni, Claudio Cipolat-Gotet, Giorgia Stocco and Andrea Summer (2019). Effect of Season and Factory on Cheese-Making Efficiency

in Parmigiano Reggiano Manufacture Department of Veterinary Science, University of Parma, Via del Taglio 10, I-43126 Parma, Italy.

- Preedy V. R., Watson R. R., Patel V. B. (2013). Handbook of cheese in health: production, nutrition and medical sciences: Production, nutrition and medical sciences, Cap 18, Parmigiano-Reggiano cheese: nutritional aspects and historical context, 261-273; Wageningen Academic Publishers.
- Prentice, J.H., Langley, K.R., Marshall, R.J. (1993). Cheese Rheology. In: Fox, P.F. (eds) Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology. Springer, Boston, MA.
- Raffaele Coppola, Mauro Nanni, Massimo Iorizzo, Alida Sorrentino, Elena Sorrentino, et al.. (2000). Microbiological characteristics of Parmigiano Reggiano cheese during the cheesemaking and the first months of the ripening. *Le Lait*, INRA Editions, pp.479-490.
- S. Romani, G. Sacchetti, P. Pittia, G.G. Pinnavaia and M. Dalla Rosa (2002). Physical, Chemical, Textural and Sensorial Changes of Portioned Parmigiano Reggiano Cheese Packed under Different Conditions. *Food science and technology international*, 8.4: 203-211.
- Scolari G., Vescovo M. (2005). Lysis of *Lactobacillus casei* 5Mn 373 accelera la maturazione del formaggio Grana. *Eur Food Res Technology* 220 , 477–482.
- T. P. Beresford, N. A. Fitzsimons, N. L. Brennan, T. M. Cogan (2001). Recent advances in cheese microbiology. *International Dairy Journal*, 11: 259-274.
- Warner, K. F. (1928). Progress report of the mechanical test for tenderness of meat. *Proc. Am. Soc. Anim. Prod.* 114–116.

Sitografia

- Caseificio CASELLO Società Agricola Cooperativa - Unità Operativa di Roncoscaglia (2022), <https://www.roncoscaglia.it/>
- Consorzio del Parmigiano Reggiano (2022). <https://www.parmigianoreggiano.com/it/>
- Parmigiano-terre alte (2022), <https://parmigiano-terrealte.com/>
- Zwickroell (2022), <https://www.zwickroell.com/>