

QUANDO LO SCARTO DIVENTA UNA RISORSA: DAL LATTE SCADUTO ALLA STAMPA 3D

M. Sindaco¹, H. Mohammadpour¹, R. Montebello², A. Derossi², R. Arrigo³, C. Severini⁴, L. Pellegrino¹, and P. D'Incecco¹

¹Dipartimento di Scienze per gli Alimenti, la Nutrizione e l'Ambiente (DeFENS), Università degli Studi di Milano, Italia

²Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimenti, Risorse Naturali e Ingegneria (DAFNE), Università di Foggia, Italia

³Dipartimento Scienza Applicata e Tecnologia (DiSAT), Politecnico di Torino, Italia

⁴Dipartimento Agricoltura, Ambiente e Alimenti (DiAAA), Università degli Studi del Molise, Italia

INTRODUZIONE

Il latte pasteurizzato possiede eccellenti proprietà nutrizionali e sensoriali grazie al moderato trattamento termico cui è sottoposto; tuttavia, la sua breve vita commerciale può favorire l'accumulo di **prodotto invenduto**. Questo viene declassato a «Sottoprodotto di categoria 3» (Reg. CE 1069/2009) e destinato a **alimentazione animale, fertilizzazione o smaltimento**. Seppur non più idoneo al consumo umano, il latte scaduto contiene ancora **circa 26 g/L di caseina**, facilmente **recuperabile e utilizzabile per fini non alimentari**, come lo sviluppo di biomateriali idonei alla stampa 3D (1-4). A seconda della **tecnica di separazione impiegata**, si possono ottenere **diversi tipi di caseina** (caseina acida, caseinato, co-precipitato, caseina presamica), ciascuna con specifiche caratteristiche chimico-fisiche e proprietà funzionali, utili per applicazioni specifiche. Tuttavia, la caseina disidratata può presentare una **scarsa solubilità** e una ridotta **capacità di reidratazione**. Gli equilibri tra le diverse forme di calcio influenzano la stabilità della caseina e incidono sulle sue proprietà fisico-chimiche e funzionali (5). L'aggiunta di agenti chelanti del calcio durante il processo di solubilizzazione, limita le interazioni proteiche e migliora la solubilità e la viscosità delle relative dispersioni. Inoltre, anche **pH** e **temperatura** influenzano il comportamento della caseina (6,7). L'effetto dell'**interazione tra questi fattori** (pH, temperatura, agenti chelanti) sulle proprietà chimico-fisiche delle dispersioni a base di caseina è oggetto di crescente interesse di ricerca, anche in applicazioni come la stampa 3D, che necessita di ingredienti solubili al fine di garantire una buona processabilità dell'inchiostro da stampare.

SCOPO

Recuperare la caseina dal latte pasteurizzato scaduto e individuare le migliori condizioni di solubilizzazione delle diverse polveri valutando l'effetto di diversi agenti chelanti, del pH e della concentrazione proteica ricostituita.

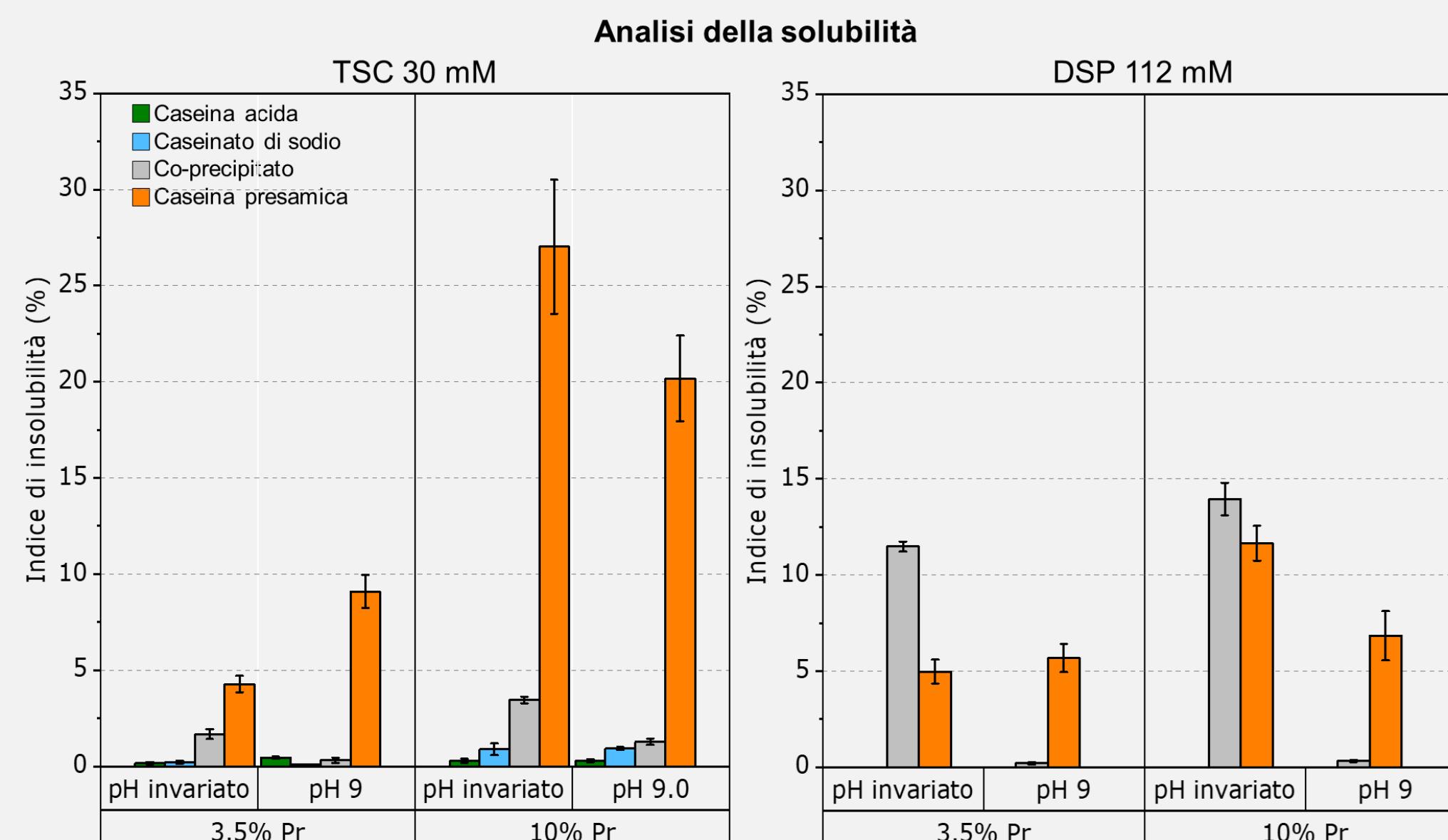
RISULTATI

► Composizione delle polveri (g/100g):

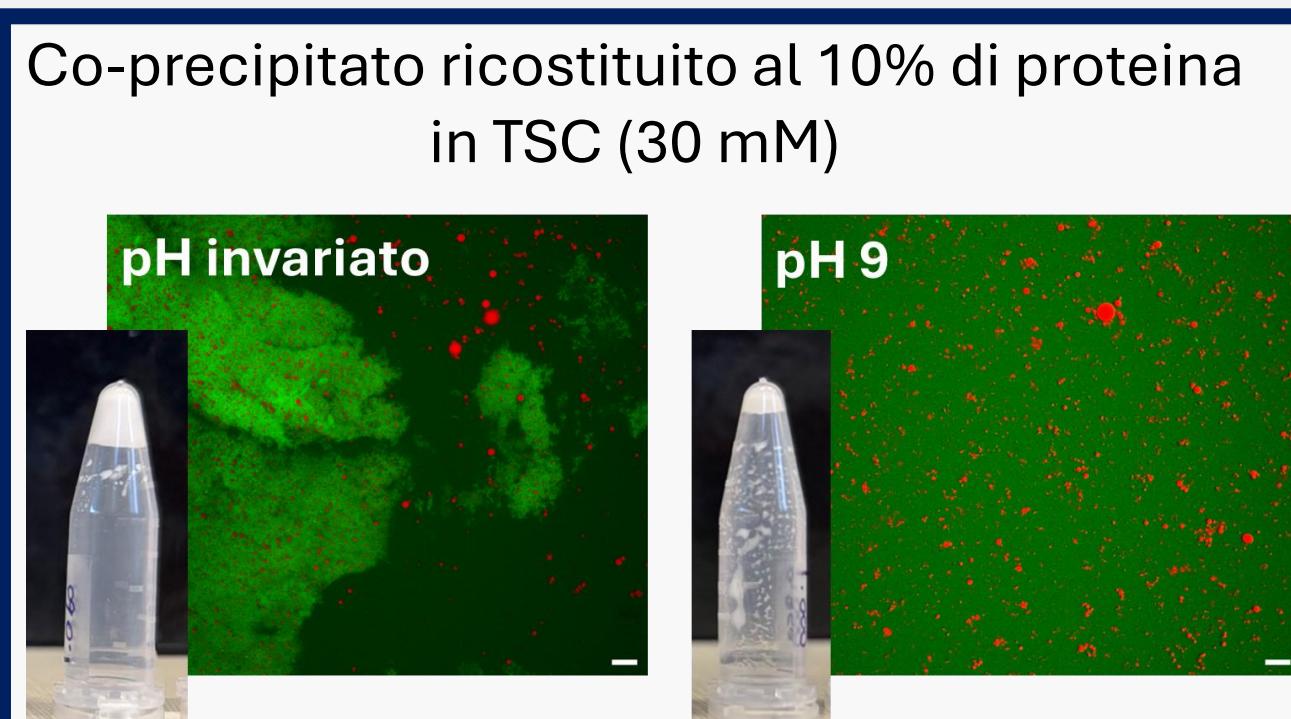
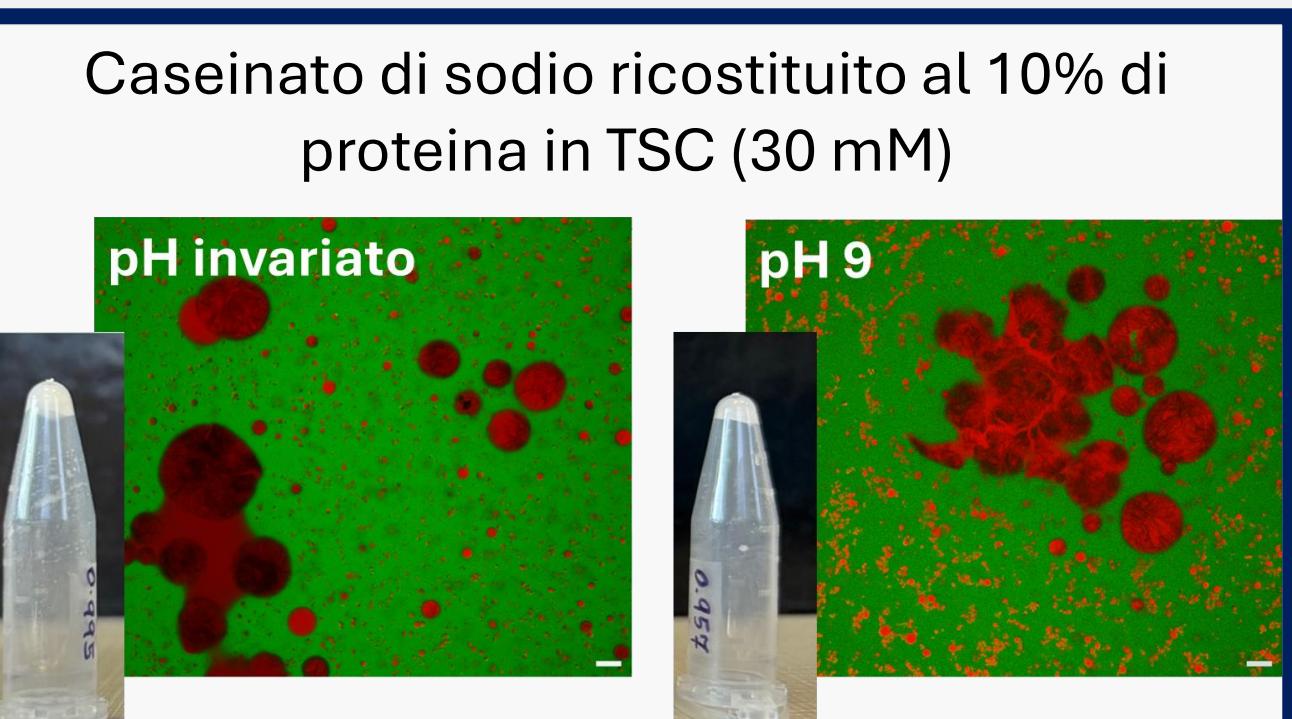
	Proteina	Grasso	Lattosio	Umidità
Caseina acida	62,31 ± 0,76 ^a	33,21 ± 0,07 ^a	1,35 ± 0,08 ^a	1,53 ± 0,21 ^{a,b}
Caseinato di sodio	60,21 ± 1,51 ^b	31,07 ± 0,06 ^b	2,50 ± 0,11 ^a	2,56 ± 1,3 ^{a,b}
Caseina presamica	48,27 ± 0,14 ^c	24,94 ± 0,00 ^c	17,30 ± 0,23 ^b	1,47 ± 0,04 ^b
Co-precipitato	63,52 ± 0,06 ^a	29,45 ± 0,08 ^d	2,01 ± 0,08 ^a	2,19 ± 0,4 ^a

► La solubilità delle polveri è risultata dipendere significativamente dal tipo di polvere e dal pH

- Caseina acida e caseinato di sodio: l'indice di insolubilità è risultato sempre <1%, indipendentemente dal pH e dalla concentrazione proteica risospesa;
- Co-precipitato: la solubilità è fortemente influenzata dal pH, migliore a pH 9;
- Caseina presamica: ha mostrato gli indici di insolubilità più alti, che incrementavano all'aumentare della concentrazione proteica risospesa.

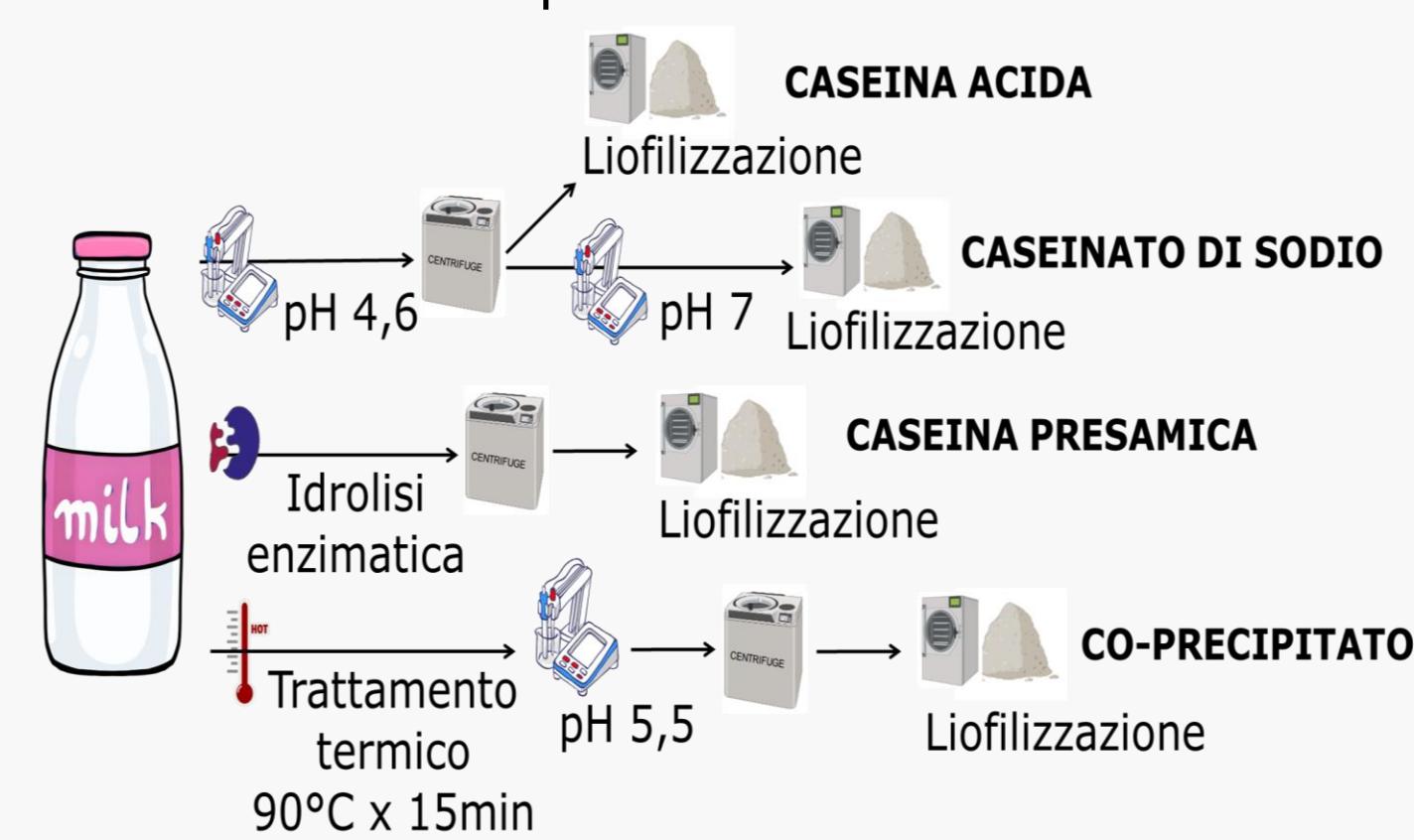


► La CLSM ha mostrato aggregati proteici di grandi dimensioni nelle soluzioni di co-precipitato e caseina presamica a pH invariato. A pH alcalino gli aggregati proteici di grandi dimensioni si sono dissociati in strutture più piccole; tuttavia si sono verificati fenomeni di coalescenza tra i globuli di grasso.



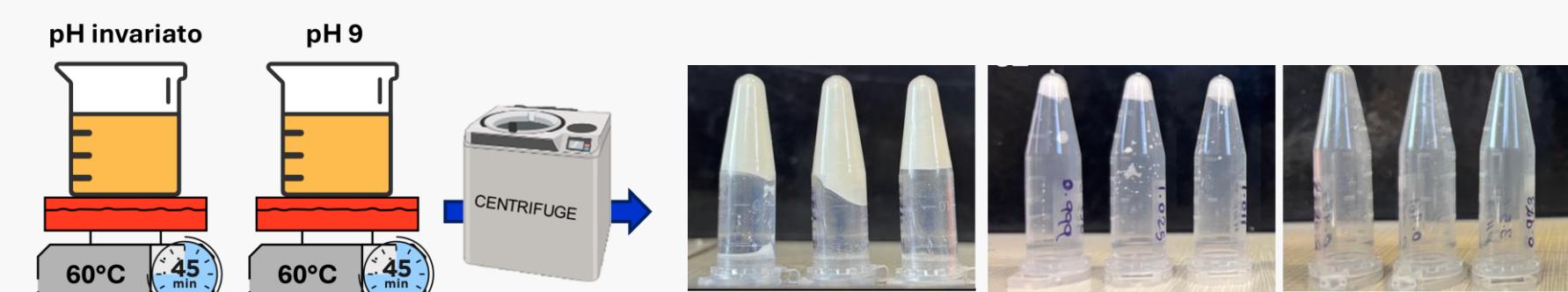
METODI E ANALISI

1) Recupero delle polveri a base di caseina da latte pasteurizzato, parzialmente scremato scaduto proveniente dal commercio:



► Determinazione della composizione.

2) Solubilizzazione delle polveri al 3,5% e 10% di proteina mediante riscaldamento a 60°C per 45 minuti in tri-sodio citrato (TSC) 30 mM e di-sodio fosfato (DSP) 112 mM e a due condizioni di pH (invariato e pH 9):



► Determinazione dell'indice di insolubilità. Calcolato come rapporto % (p/p) tra il peso del pellet ottenuto dopo centrifugazione (36g x 10min) e il peso di 1.5 mL di dispersione.

3) Caratterizzazione delle dispersioni:

► Microscopia confocale a scansione laser (CLSM) previa colorazione delle dispersioni con Fast Green e Nile Red per visualizzare rispettivamente proteine e grasso.

4) Stampa 3D: Soluzioni di caseinato di sodio al 11% e di idrossipropilmethylcellulosa (HPMC) al 12% sono state preparate in acqua, riscaldandole rispettivamente a 90 °C e 80 °C, quindi mescolate tra loro. Il gel è stato mantenuto a 40 °C overnight e sottoposto a stampa 3D a 25 °C e 50 °C.

► L'analisi di immagine condotta sui prototipi stampati 3D con il gel a base di caseinato di sodio conferma la buona replicabilità del modello digitale.

CERCHIO	Modello digitale 3D	Campione stampato in 3D (media ± ds)
Dimensione (larghezza * lunghezza, mm)	45	41.4 ± 0.0
Dimensione dei pori (larghezza * lunghezza, mm)	3 * 3	2.6 ± 0.0 * 2.5 ± 0.0
Dimensione filamento (mm)	1.2	1.2 ± 0.0
QUADRATO	Modello digitale 3D	Campione stampato in 3D (media ± ds)
Dimensione (larghezza * lunghezza, mm)	50 * 50	46.6 ± 0.0 * 47.2 ± 0.0
Dimensione dei pori (larghezza * lunghezza, mm)	3 * 3	2.6 ± 0.0 * 2.5 ± 0.0
Dimensione filamento (mm)	1.2	1.1 ± 0.0

► Ulteriori test di stampa 3D hanno permesso di sviluppare prototipi destinati alla conservazione di spezie e altri prodotti alimentari.



CONCLUSIONI

Il tipo di caseina si è mostrato il fattore che ha maggiormente influenzato le caratteristiche delle dispersioni. In particolare, la caseina acida ed il caseinato di sodio hanno mostrato un'ottima solubilità in tutte le condizioni testate. Diversamente, il co-precipitato ha mostrato una buona solubilità solo a pH alcalino. La scarsa solubilità della caseina presamica è migliorata solo nelle dispersioni al 3,5% di proteina, e soprattutto in TSC; nessuna sua dipendenza dal pH è stata osservata. La combinazione di vari fattori (tipo di polvere, pH, agente chelante) consente di modificare le caratteristiche delle dispersioni a base di caseina evidenziando il suo ruolo chiave nella progettazione di materiali che abbiano specifiche proprietà.

BIBLIOGRAFIA: (1) Costa et al., (2021). (2) Wilms et al., (2021). (3) Daffner et al., (2021). (4) Gerna, S., et al., (2025). (5) Deshwal et al., (2023). (6) McIntyre et al., (2016). (7) Crowley, et al., (2015).