

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE
IN
INGEGNERIA DEI GIACIMENTI DI IDROCARBURI M**

**Applicazione di schiumogeno in condotte a gas:
prove in campo, analisi critica e confronto delle soluzioni
per lo spiazzamento dei fluidi in orizzontale**

Candidato:

Cristiano Ascolani

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ezio Mesini

Correlatori:

**Prof. Paolo Macini
Ing. Ettore Saluci**

*DEDICA ancora in fase
di stesura, forse non farà
parte del lavoro... .*

Sommario

L'industria di processo legata al settore dell'*Oil&Gas* risente fortemente delle condizioni di trasporto in condotta delle risorse prodotte. Il piggaggio rappresenta oggi l'operazione consueta per la pulizia e lo spiazzamento delle linee. I pig presentano numerosi problemi, come il rischio di blocco o l'impossibilità di utilizzo a causa del design di rete. Gli schiumogeni, impiegati in numerosi ambiti nella produzione di idrocarburi, posso operare nello spiazzamento delle condotte a gas orizzontali. Il metodo è del tutto simile all'iniezione di *foamer* nel *Gas Well Deliquification*, dove si sfrutta l'abbassamento della tensione superficiale per favorire il trascinamento della fase liquida a fondo pozzo da parte della corrente gassosa. Il test di efficacia è stato effettuato da Edison S.p.A., in collaborazione con Chimec S.p.A., nella linea a gas di Verdicchio, appartente al polo produttivo di San Giorgio Mare (FM). I surfactanti hanno agito in sole due ore dall'applicazione, con lo spiazzamento di 12,74 m³ di acqua, un aumento della produzione di gas del 5% e una diminuzione della contropressione di 9,5 bar. I tensioattivi dimostrano grandi potenzialità anche in questo ambito e la sfida futura è rappresentata dalla ricerca e lo sviluppo di procedure operative consolidate.

Indice

Introduzione	1
1 Moto dei fluidi nelle condotte in pressione	5
1.1 Il concetto di fluido e nozioni fondamentali	5
1.2 Moto e equazioni fondamentali	7
1.3 Calcolo delle cadute di pressione per attrito	12
1.3.1 Numero di Reynolds	12
1.3.2 Fattore di attrito di Moody	13
1.3.3 Perdite di carico per un liquido	14
1.3.4 Perdite di carico per un gas	16
1.3.5 Perdite di carico concentrate	18
1.4 Moto multifase	19
1.4.1 Regime di flusso in condotta	19
1.4.2 Cadute di pressione per attrito di un flusso bifase	27
2 Applicazioni di schiumogeno per l'ottimizzazione della produzione di gas naturale	29
2.1 Liquid loading	30
2.1.1 Ciclo di vita di un pozzo a gas	30
2.1.2 Problemi legati al <i>liquid loading</i>	30
2.1.3 Sorgenti di liquidi per un pozzo a gas	31
2.1.4 Velocità critica	32
2.1.5 NODAL* analysis TM	33
2.2 Sollevamento artificiale per GDW	34

2.2.1	Velocity string	35
2.2.2	Compressione	36
2.2.3	Plunger	37
2.2.4	Altri sistemi di sollevamento artificiale per deliquification	41
2.3	Schiumogeni	42
2.3.1	Tensioattivi	44
2.3.2	Schiuma	46
2.3.3	Antischiuma	49
2.4	Applicazione di schiumogeni per GWD	52
2.4.1	Schiumogeni in-batch	53
2.4.2	Schiumogeni in continuo	55
3	Impianti di trattamento del gas naturale	63
3.1	Specifiche del gas di vendita	63
3.2	Separazione gas-liquido	67
3.3	Disidratazione e degasolinaggio	69
3.3.1	Inibizione chimica	71
3.3.2	Disidratazione per raffreddamento	73
3.3.3	Disidratazione mediante assorbimento con glicol	75
3.3.4	Disidratazione mediante adsorbimento con setacci molecolari	77
3.3.5	Degasolinaggio	78
3.4	Altri trattamenti	80
3.5	Apparecchiature di processo e impianti particolari	81
3.5.1	Separatori	82
3.5.2	Scambiatori di calore	84
3.5.3	Compressori	85
3.5.4	Espansori	87
3.5.5	Impianti frigoriferi	89
4	Sistemi di piggaggio di condotte in pressione	91
4.1	Configurazione degli scovoli	92

4.2	Obiettivi del piggaggio	94
4.2.1	Scovoli di servizio	96
4.2.2	Strumenti di ispezione interna	100
4.2.3	Scovoli gel	102
4.3	Procedure di lancio e recupero del pig	103
4.3.1	Esempi di configurazione di sistemi di piggaggio	105
4.4	Mezzo di spinta del piggaggio	108
4.5	Progettazione del sistema di condotte per il piggaggio	108
4.5.1	Lunghezza del cammino del pig	109
4.5.2	Raggio di curvatura	109
4.5.3	Tipologia di valvole presenti	109
4.5.4	Indicatori di passaggio del pig	110
4.5.5	Altri dettagli progettuali	112
4.6	Bloccaggio dello scovolo	112
4.6.1	Soluzioni	113
4.6.2	Fasi operative	113
5	Linea di produzione di Verdicchio: tensioattivi per lo spiaz-zamento dell'acqua in condotta	115
5.1	Polo produttivo di San Giorgio Mare	117
5.1.1	La linea Verdicchio	119
5.1.2	Campo Verdicchio	120
5.1.3	Campo San Marco	120
5.1.4	La centrale di San Giorgio Mare	122
5.2	Configurazione sperimentale: materiali e modalità di esecuzione	130
5.2.1	Schiumogeno	131
5.2.2	Antischiuma	131
5.2.3	Punto di iniezione	131
5.2.4	Iniezione in-batch	133
5.2.5	Iniezione in continuo	135
5.2.6	Controllo della schiuma in centrale	136
5.2.7	Apparati di misura	137

5.3 Risultati e discussione	138
5.3.1 Studio degli effetti a breve termine	138
5.3.2 Andamento produttivo post-test	141
5.3.3 Pozzo Verdicchio	144
5.3.4 Campo San Marco	144
5.3.5 Analisi costi e benefici	150
5.3.6 Piggaggio della linea di Verdicchio	151
5.3.7 Discussione dei risultati	159
Conclusioni	169
Bibliografia	173

Elenco delle figure

1.1	Azioni esercitate da un fluido tra due superfici in moto relativo (Guglielmini et al. 2004)	6
1.2	Reologia di un fluido nel caso di fluidi newtoniani e non newtoniani (Guglielmini et al. 2004)	7
1.3	Schematizzazione del parallelepipedo fondamentale o volume di controllo VC (Chierici 1989)	9
1.4	Regime di flusso monofase in condotta	12
1.5	Diagramma di Moody per il calcolo del fattore di attrito in condotta.	15
1.6	Regimi di flusso bifase in condotte verticali (Lake et al. 2006).	20
1.7	Mappa per regimi di flusso bifase per condotte verticali (Grif- fith et al. 1984)	21
1.8	Regimi di flusso bifase in condotte orizzontali (Lake et al. 2006)	22
1.9	Mappa di Griffith et al. (1984) per regimi di flusso bifase per condotte orizzontali.	23
1.10	Mappa di Baker (1954) per regimi di flusso bifase per condotte orizzontali.	24
1.11	Mappa di Taitel et al. (1976) per regimi di flusso bifase per condotte orizzontali. Gli assi di riferimento cambiano a secon- da della curva considerata, come descritto nel pannello al di sotto del grafico.	25

2.1	Schematizzazione del ciclo di un pozzo a gas, combinata con l'analisi della curva di declino (Lea et al. 2011).	31
2.2	Schematizzazione dell'analisi nodale combinata alla portata critica di trascinamento.	34
2.3	Schema di applicazione della <i>velocity string</i> (Arachman et al. 2004).	36
2.4	Layout semplificato del GasJack TM , copressore singolo utilizzato per operazioni di compressione della testa pozzo (Garner et al. 2009).	37
2.5	Tipica installazione di plunger (Lea et al. 2011).	39
2.6	Ciclo di un plunger convenzionale.	39
2.7	Principali tipologie di plunger proposte da Weatherford (Weatherford International Ltd. 2008).	40
2.8	Laurilsolfato di sodio, tensioattivo anionico utilizzato in molte famiglie di prodotti domestici. La catena a 12 atomi di carbonio rappresenta il gruppo apolare (in blu) mentre il gruppo solfato associato allo ione sodio rappresenta il gruppo polare (in viola).	45
2.9	Classificazione dei tensioattivi in base alla carica del gruppo polare.	45
2.10	Sezione parziale di una micella anionica, il layer compatto negativo generato dall'orientamento del gruppo polare del tensioattivo è circondato dalla fase acqua (Attwood et al. 2012). .	46
2.11	Insufflazioni nel liquido e generazione delle bolle d'aria (Tego Chemie Service GmbH 2014).	47
2.12	Struttura della schiuma e stabilizzazione della lamella a opera dei surfactanti (Tego Chemie Service GmbH 2014).	48
2.13	Penetrazione e espansione del <i>defoamer</i> sul film di tensioattivi (Tego Chemie Service GmbH 2014).	50
2.14	Processo di bridging del <i>defoamer</i> sul film di tensioattivi (Tego Chemie Service GmbH 2014).	50

2.15 Processo di dewetting del <i>defoamer</i> sul film di tensioattivi (Tego Chemie Service GmbH 2014)	51
2.16 Tensione superficiale e densità della schiuma in funzione della concentrazione in acqua per tensioattivi attualmente disponibili sul mercato (Campbell et al. 2001)	52
2.17 Applicazione di <i>foamer</i> in-batch su un pozzo con produzione a shut-in programmati (Wittfeld et al. 2015)	54
2.18 Schema generale di sistema di iniezione <i>foamer</i> in continuo tramite <i>capillary string</i> (Wittfeld et al. 2015)	56
2.19 Valutazione pre- e post-applicazione di <i>foamer</i> in continuo su un pozzo affetto da <i>liquid loading</i> (Wittfeld et al. 2015)	59
3.1 Diagramma di fase per una miscela multicomponente (Bianco 2005a)	66
3.2 Diagramma della formazione degli idrati in funzione di temperatura e pressione (Bianco 2005a)	71
3.3 Danni in condotta creati dalla formazione di idrati (Borghi 2005)	72
3.4 Inibizione degli idrati tramite glicol etilenico (Bianco 2005a) . .	73
3.5 Condizionamento del gas tramite separatore a bassa temperatura (Bianco 2005a)	74
3.6 Schema semplificato di disidratazione con glicol (Bianco 2005a) .	76
3.7 Schema di disidratazione a due letti (Bianco 2005a)	78
3.8 Lavaggio amminico (Bianco 2005a)	81
3.9 Separatori orizzontali e verticali bifase dotati di dispositivi snebbianti (Peerless Mfg. Co 2009)	83
3.10 Separatore trifase e del pacco lamellare (Bianco 2005b)	84
3.11 Scambiatore di calore a fasci tubieri (Guadagni 2003)	84
3.12 Scambiatore a piastre (Guadagni 2003)	85
3.13 Compressori (Guadagni 2003)	88
3.14 Refrigerazione meccanica (Bianco 2005a)	89

4.1	Configurazione dello scovolo (Davidson 2002).	93
4.2	Componenti tipici di uno scovolo di servizio (T.D. Williamson, Inc. 2015).	95
4.3	Scorrimento dello scovolo di pulizia in condotta e rimozione dei depositi solidi in condotta (Davidson 2002).	97
4.4	Dispositivi di pulizia delle condotte (T.D. Williamson, Inc. 2015).	98
4.5	Diverse tipologie di trappole di lancio (T.D. Williamson, Inc. 2015).	99
4.6	Desalinizzazione della condotta con treni di acqua dolce e glicol (Davidson 2002).	100
4.7	Scovoli di ispezione interna tradizionali (T.D. Williamson, Inc. 2015).	101
4.8	Scovolo a dispersione di flusso magnetico (T.D. Williamson, Inc. 2015).	102
4.9	Scovolo gel EVO-Pig, Aubin Ltd (Johnston 2015).	103
4.10	Dispositivi di chiusura a portelloni delle trappole di lancio e ricezione (T.D. Williamson, Inc. 2015).	104
4.11	Configurazione base di una trappola di lancio (Davidson 2002).	105
4.12	Diverse tipologie di trappole di lancio (T.D. Williamson, Inc. 2015).	107
4.13	Blocco degli scovoli in corrispondenza di valvole (Guadagni 2003).	110
4.14	Indicatori di posizione dello scovolo in condotta (T.D. Williamson, Inc. 2015).	111
4.15	Possibili cause e soluzioni legate all'arresto di pig in linea (Lulio et al. 2006).	114
5.1	Rappresentazione schematica dell'acqua localizzata negli abbassamenti di quota della condotta.	116
5.2	Planimetria delle installazioni on-shore e off-shore relative al polo produttivo di San Giorgio Mare.	118

5.3	Aree pozzo e avvallamenti attraversati dalla linea Verdicchio.	119
5.4	Variazioni di quota lungo la linea Verdicchio.	120
5.5	Area pozzo di Verdicchio.	121
5.6	Area pozzo di San Marco.	122
5.7	Vista dall'alto della centrale di San Giorgio Mare.	123
5.8	Separatori a monte di tutto il trattamento gas.	123
5.9	Vista da Sud dell'impianto di compressione: in verde gli stabili ospitanti i compressori, in bianco gli impianti di raffreddamento ad aria.	124
5.10	Separatore a freddo LTS-2.	126
5.11	Scaldatore indiretto a bagno d'acqua.	127
5.12	Unità VESCOM 3V.	129
5.13	Serbatoio di stoccaggio acque S117.	130
5.14	Layout linea di mandata SNM, modalità di applicazione del batch.	133
5.15	Applicazione di schiumogeno in-batch: immissione e dettaglio della PCV.	135
5.16	Immissione dello schiumogeno in continuo.	136
5.17	Principio di funzionamento dello schiumogeno in continuo. Al fine di mantenere una concentrazione minima di attivazione si applica un batch di <i>foamer</i> iniziale.	137
5.18	Arrivo di acqua in centrale mista a schiuma e polvere nera in soluzione.	139
5.19	Variazione della pressione e temperatura misurato sulla mandata di San Marco, in relazione alla portata d'acqua confluuta presso la centrale SGM	140
5.20	Test visivo dell'efficacia dell'antischiuma, da sinistra a destra campioni prelevati rispettivamente a monte e a valle del separatore.	141

5.21 Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeo sulla linea Verdicchio, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.	143
5.22 Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeo sul pozzo Verdicchio, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.	145
5.23 Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeo sul campo San Marco, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.	146
5.24 Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeno sul pozzo SM2B del campo San Marco, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.	148
5.25 Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeno sul pozzo SM3B del campo San Marco, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.	149
5.26 Analisi costi e ricavi per i due rispettivi scenari di riferimento.	151
5.27 Trappola di lancio del campo Verdicchio.	152
5.28 Valutazione degli effetti dello spiazzamento con piggaggio sul sul campo San Marco, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al <i>pigging</i>	154
5.29 Confronto dell'andamento dei valori di portata di campo San Marco tra l'intervallo temporale relativo al piggaggio (dal 24 aprile 2015 al 3 novembre 2013) e l'intervallo temporale dell'applicazione di schiumogeno in condotta (dal 7 marzo 2015 al 16 settembre 2015). Entrambe le operazioni sono state svolte il giorno 98 della serie temporale.	156

5.30 Confronto dell'andamento dei valori di pressione in linea di campo San Marco tra l'intervallo temporale relativo al piggaggio (dal 24 aprile 2015 al 3 novembre 2013) e l'intervallo temporale dell'applicazione di schiumogeno in condotta (dal 7 marzo 2015 al 16 settembre 2015). Entrambe le operazioni sono state svolte il giorno 98 della serie temporale.	157
5.31 Confronto dell'andamento dei valori di acqua prodotta di campo San Marco tra l'intervallo temporale relativo al piggaggio (dal 24 aprile 2015 al 3 novembre 2013) e l'intervallo temporale dell'applicazione di schiumogeno in condotta (dal 7 marzo 2015 al 16 settembre 2015). Entrambe le operazioni sono state svolte il giorno 98 della serie temporale.	158
5.32 Pig chimico, spiazzamento della condotta in un unico cuscino d'acqua tramite schiumogeni.	160
5.33 Influenza della PCV collocata sulla linea di mandata di San Marco nella produzione del fronte di schiuma	161
5.34 Rappresentazione schematica della relazione tra viscosità apparente e qualità della schiuma (Gajbhiye et al. 2011).	164
5.35 Sequenza temporale dello scorrimento di schiuma in condotta in configurazione di cuscino compatto, la trama delle bolle rimane costante nel tempo (Briceno et al. 2003).	165
5.36 Schematizzazione della caratterizzazione del flusso di una schiuma in condotte orizzontali basata sulla trama e sul regime di moto (Gajbhiye et al. 2011).	166

Elenco delle tabelle

1.1	Coefficienti C adimensionali per la formula di Hazen-Williams (Di Marco 2006).	16
2.1	Alcuni esempi di applicazioni di tensioattivi nell'industria petroliera; e fasi G, W e O rappresentano rispettivamente il gas, l'acqua e l'olio (Schramm 2006).	43
3.1	Composizione centesimale di un gas naturale tramite cromatografia del gas (Mele 2012).	64
3.2	Parametri di controllo della qualità richiesti dalla Snam Rete Gas (Snam Rete Gas 2015).	68
3.3	Composizione centesimale stimata di gasolina da gas naturale tramite distillazione (Anderson et al. 1924).	79
5.1	Parametri fisico-chimici dello schiumogeno e dell'antischiumogeno presi dalle rispettive schede di sicurezza.	132
5.2	Calcolo costi associati all'applicazione di schiumogeno.	150
5.3	Analisi guadagno nei due diversi scenari pre- e post-test.	150

Nomenclatura

Γ	qualità della schiuma
Σ	coefficiente di espansione del tensioattivo, N/m
ε	scabrezza assoluta
γ	peso specifico, N/m ³
λ	fattore di attrito di Moody
μ	viscosità dinamica, Pa s
ξ	frazione di vuoto
ρ	densità, kg/m ³
σ	tensione superficiale, N/m
τ	sforzo di taglio, N/m ²
φ	fattore di efficienza del flusso
χ	parametro di Martinelli
A	area, m ²
B	coefficiente di <i>bridging</i> del tensioattivo, N ² /m ²
C_d	coefficiente di galleggiamento
D	diametro interno della condotta, m

<i>E</i>	coefficiente di penetrazione del tensioattivo, N/m
<i>F</i>	forza, N
<i>Fr</i>	numero di Froude
<i>H</i>	entalpia, J
<i>I_W</i>	indice di Wobbe, J/Smc
<i>L</i>	lavoro, J
<i>PCS</i>	potere calorifico superiore, J/Smc
<i>Q</i>	calore, J
<i>Re</i>	numero di Reynolds
<i>S</i>	entropia, J/K
<i>T</i>	temperatura, K
<i>V</i>	volume, m ³
\dot{V}	portata volumetrica, m ³ /s
<i>Z</i>	fattore di compressibilità del gas
<i>c</i>	concentrazione in soluzione, ppm
<i>f</i>	numero di Fanning
<i>h</i>	altezza idrica, m
<i>j</i>	velocità di massa o velocità di flusso, kg/(m s ²)
<i>l</i>	lunghezza della condotta
<i>m</i>	massa, kg
\dot{m}	portata massica, kg/s

p	pressione, Pa
t	tempo, s
v	volume specifico, m^3/kg
vol_u	volume per unità di lunghezza, m^3/m
w	velocità, m/s
w_c	velocità critica di Turner, m/s
w_t	velocità terminale, m/s
x	titolo di vapore
z	quota geodetica, m

Introduzione

Il settore dell'*Oil&Gas* provvede oggi a gran parte del fabbisogno energetico mondiale. Gli idrocarburi assumono quindi enorme importanza nell'economia e nella geopolitica moderna grazie al ruolo fondamentale di fonte energetica. Nell'ambito dell'Industria Petrolifera si parla spesso di *Flow Assurance*, concetto coniato dalla Petrobras all'inizio degli anni '90, che lega in modo biunivoco la resa economica della produzione di idrocarburi con il mantenimento di condizioni ottimali di trasporto in condotta dal giacimento al punto di vendita.

I surfactanti risultano essere una delle soluzioni più idonee e versatili per migliorare la produzione di idrocarburi. Gli schiumogeni sono impiegati in tutte le fasi, dalle operazioni di perforazione, al recupero assistito di petrolio o gas , fino al trasporto e il trattamento. Negli ultimi anni gli schiumogeni sono stati al centro di applicazioni per l'attenuamento del battente idrostatico di pozzi a gas caratterizzati da ingenti produzioni di acqua. L'incapacità di un pozzo di non spiazzare i liquidi al suo interno porta alla generazione di una forte contropressione che tende a opporre resistenza al normale deflusso del gas dal giacimento al *tubing*. I surfactanti permettono la riduzione della tensione superficiale dei liquidi accumulati e il loro spiazzamento senza l'immissione di energia dall'esterno.

Nell'ambito della produzione di gas naturale il problema delle contropressioni generate da liquidi non riguarda solamente i pozzi; anche le condotte possono essere interessate da accumuli localizzati di acqua di condensa o di produzione. L'*hold-up* dei liquidi provoca restringimenti lungo la condotta

che si traducono in perdite di carico, diminuendo così la portata di gas in linea.

Per ovviare al problema, sono operati periodicamente in condotta dei lanci di pig, dispositivi in grado di svolgere numerose operazioni, tra cui quella di pulizia e di spiazzamento dei fluidi stagnanti. Il piggaggio della linea presenta problemi legati al rischio di blocco dello strumento in linea e alla predisposizione della rete al passaggio del pig.

A fronte di tali considerazioni, l'impiego di schiumogeni per lo spiazzamento delle condotte orizzontali può ovviare agli svantaggi relativi al piggaggio della. Lo schiumogeno immesso in condotta raggiunge le zone di accumulo, agisce sul fluido e consente il trascinamento dello stesso tramite la corrente gassosa.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di valutare l'efficacia dei tensioattivi in orizzontale, in presenza di fenomeni di *hold-up* in linea. Il test è stato effettuato durante l'esperienza di tirocinio formativo e di orientamento presso la Edison S.p.A. nella sede operativa di Sambuceto (CH). Per l'applicazione ha interessato la linea di Verdicchio, appartenente al polo produttivo di San Giorgio Mare (FM). Le operazioni sono state svolte in collaborazione con la Chimec S.p.A., che ha fornito supporto tecnico e i prodotti chimici utilizzati. L'efficacia è stata confermata tramite il controllo dei parametri di produzione sul campo fino allo spiazzamento della condotta e il monitoraggio degli stessi nelle settimane successive.

Il lavoro di tesi si struttura in cinque capitoli principali. Il primo capitolo tratta le condizioni di regime di flusso multifase in condotta e le perdite di carico correlate. Nel secondo capitolo si discutono le proprietà fisico-chimiche dei tensioattivi, delle schiume e dell'applicazione di schiumogeni a fondo pozzo. Nel terzo e nel quarto capitolo si affrontano gli impianti di superficie per il trattamento del gas naturale e le relative tecniche per la pulizia e il mantenimento delle condotte. Nell'ultimo capitolo sono invece esposte le procedure operative dell'applicazione di schiumogeno in linea orizzontale effettuata presso il polo di San Giorgio Mare e i risultati avuti nel breve-medio

termine.

L'impostazione del seguente lavoro è stata scelta accuratamente al fine di esporre in modo semplice e chiaro le conoscenze tecniche di base utili alla totale comprensione dell'applicazione in esame. L'importanza delle competenze tecniche e teoriche possono favorire il processo di ottimizzazione del metodo, potenzialmente un importante soluzione alternativa al piggaggio tradizionale delle condotte a gas.

Capitolo 1

Moto dei fluidi nelle condotte in pressione

La fluidodinamica è un ramo della meccanica del continuo e studia il comportamento di liquidi e gas in movimento. Si parla di termofluidodinamica quando, in alcuni processi, le grandezze e i fenomeni termici sono particolarmente rilevanti. Lo studio del moto dei fluidi in condotta riveste notevole importanza nella progettazione di qualsiasi impianto industriale, dove il calcolo delle perdite di carico rappresenta il nodo cruciale per un'appropriata interpretazione e risoluzione del problema. Solitamente in ambito tecnico non si fa riferimento a fluidi monofase, bensì a fluidi multifase, dove l'iterazione tra fasi gioca un ruolo fondamentale e il calcolo delle variabili è possibile solo grazie a modelli complessi e fortemente dipendenti dalle condizioni al contorno.

1.1 Il concetto di fluido e nozioni fondamentali

Per fluido si intende un materiale che non è in grado di reagire a sforzi di taglio statici. Non si trasmettono quindi, in condizioni di quiete, forze parallele attraverso una qualunque superficie ideale tracciata nel fluido. Attraverso la

stessa superficie possono trasmettersi forze perpendicolari, la cui risultante è nota come pressione p .

La densità di un fluido ρ è definita come la massa dell'unità di volume. Si definisce densità relativa ρ_r il rapporto tra la densità del materiale e quella dell'acqua a pressione atmosferica e temperatura a 4°C. Il peso specifico γ è il peso dell'unità di volume. Per volume specifico v si intende il volume dell'unità di massa, cioè l'inverso della densità.

In condizioni dinamiche un fluido, al contrario delle condizioni di quiete, reagisce a sforzi di taglio. Si consideri un meato (intercapedine in cui è presente un piccolo strato di fluido), delimitato tra due pareti piane indefinite, una in quiete e l'altra in movimento con velocità w (Figura 1.1). Il moto

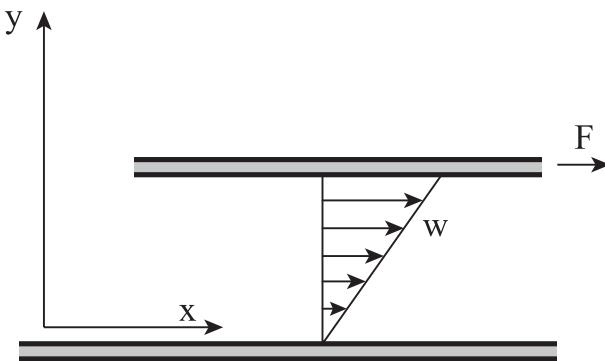


Figura 1.1: Azioni esercitate da un fluido tra due superfici in moto relativo (Guglielmini et al. 2004).

relativo tra fluido e parete è nullo, nel meato si crea quindi un campo di velocità triangolare, dove i piani di fluido scorrono l'uno sull'altro. Questo genera una forza resistente sulla superficie della parete superiore in moto. Indicando con A l'area della superficie di contatto tra la lastra e il fluido, la forza resistente F è espressa in modulo dalla legge di Newton:

$$F = \mu A \frac{dw}{dy} \implies \tau_{yx} = \frac{F}{A} = \mu \frac{dw}{dy} \quad (1.1.1)$$

in cui μ è una proprietà del fluido detta viscosità dinamica e τ_{yx} rappresenta lo sforzo di taglio viscoso ovvero la forza che agisce per unità di area su una superficie interna al fluido in direzione parallela a tale superficie, e $\frac{dw}{dy}$ è la

derivata della velocità del fluido rispetto alla componente verticale del moto. Lo sforzo di taglio è proporzionale alla viscosità e al gradiente di velocità. Il rapporto è direttamente proporzionale se i fluidi sono classificabili come newtoniani, cioè se la viscosità è indipendente dallo sforzo viscoso per determinate condizioni di temperatura e pressione. Per i fluidi non newtoniani vale la seguente formula:

$$\frac{dw}{dy} = \frac{\tau}{\mu(\tau)} \quad (1.1.2)$$

A seconda dell'andamento della funzione $\mu(\tau)$ i fluidi possono essere classificati come "pseudo plastici" o "dilatanti" (Figura 1.2).

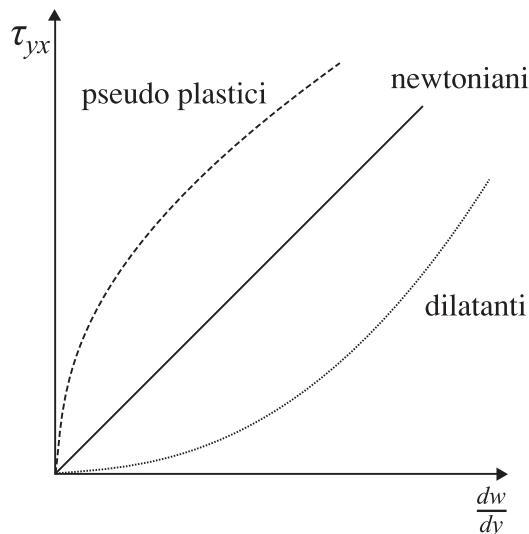


Figura 1.2: Reologia di un fluido nel caso di fluidi newtoniani e non newtoniani (Guglielmini et al. 2004).

1.2 Schematizzazione del moto e equazioni fondamentali di conservazione

La rappresentazione analitica del moto di un fluido è assai complessa e richiede l'impiego di modelli al fine di semplificare la descrizione qualitativa e

quantitativa di tale moto. Vengono indicate le tre figure fondamentali per la descrizione del moto di un fluido:

- **traiettoria di una particella:** il luogo dei punti occupati in tempi successivi dalla stessa particella fluida;
- **linea di corrente o linea di flusso:** è una linea che ha per tangente il vettore velocità in ogni punto;
- **linea di fumo:** è il luogo dei punti occupati, ad un dato istante, dalle particelle che sono passate per uno stesso punto.

Nel caso di moto permanente questi tre luoghi geometrici coincidono. Si definisce vena fluida o filetto di corrente l'insieme delle traiettorie le cui sezioni trasversali hanno velocità (perpendicolare alla sezione stessa), pressione, temperatura e volume specifico costanti.

Il modello di riferimento è quello di moto uni- o monodimensionale e si assumono condizioni di regime permanente di massa e termodinamico. In termini fisici il modello deve rispettare i principi di:

- **conservazione della massa;**
- **conservazione della quantità di moto;**
- **bilancio di energia.**

Conservazione della massa

Dato un sistema di coordinate cartesiane (x, y, z), si consideri un volume di controllo (VC) con gli spigoli dx, dy, dz , attraversato da un fluido con velocità w e densità ρ (Figura 1.3). Siano w_x, w_y e w_z le componenti del vettore velocità lungo gli assi principali. Si definisce j velocità di massa o flusso di massa e si calcola la portata massica in entrata e in uscita sul VC lungo le tre direzioni principali. Se si sommano queste portate, si esprime la variazione di massa infinitesima dm nel tempo infinitesimo dt relativa al VC:

$$dm = - \left[\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} \right] dx dy dz dt \quad (1.2.1)$$

La massa di VC può essere espressa anche come il prodotto della densità del fluido per il volume :

$$m = \rho dx dy \quad (1.2.2)$$

e la variazione nel tempo è:

$$dm = \frac{\partial}{\partial t} \rho dx dy dz \quad (1.2.3)$$

Per il principio di conservazione della massa, la (1.2.1) e la (1.2.3) devono equivalersi:

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.2.4)$$

La (1.2.4) rappresenta l'equazione di continuità di un fluido in coordinate cartesiane e può essere anche scritta come:

$$\vec{\nabla}(\rho \vec{w}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.2.5)$$

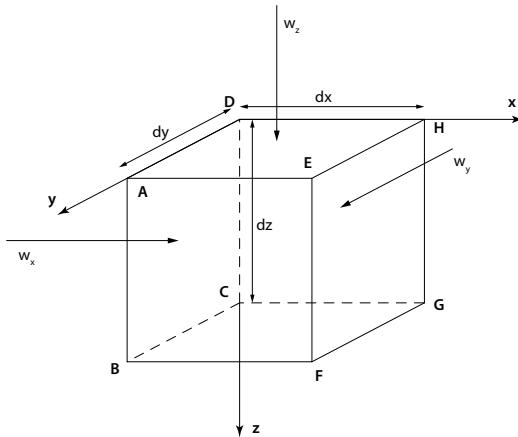


Figura 1.3: Schematizzazione del parallelepipedo fondamentale o volume di controllo VC (Chierici 1989).

Bilancio della quantità di moto

La conservazione della quantità di moto è espressa dal secondo principio della dinamica. Dato un volume di controllo VC (definito precedentemente)

la somma della variazione della quantità di moto nel tempo dt del fluido di volume V e del flusso netto di quantità di moto attraverso la superficie S è uguale alla risultante delle forze esterne agenti sul fluido contenuto nel volume stesso. In forma integrale:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{w} dV + \oint_A (\rho \vec{w}) \cdot \hat{n} dA = \int_V \vec{F}_V dV + \oint_A \underline{\underline{T}} dA \quad (1.2.6)$$

dove $\underline{\underline{T}}$ rappresenta il tensore delle tensioni, \hat{n} il relativo versore e \vec{F}_V le forze di volume. In forma differenziale la (1.2.6) diventa:

$$\rho \frac{D\vec{w}}{Dt} = \rho \vec{F}_V + \nabla \cdot \underline{\underline{T}} \quad (1.2.7)$$

che esprime il bilancio della quantità di moto per unità di volume.

Bilancio di energia e equazione di Bernoulli

Tra le sezioni estreme di una generica vena fluida si applica l'equazione di bilancio dei sistemi aperti a regime permanente. Si considera come VC il volume racchiuso tra le due sezioni sopra citate. L'equazione di bilancio per unità di massa di un sistema aperto si può scrivere in forma differenziale come:

$$dQ - dL_e = dH + \frac{dw^2}{2} + g dz \quad (1.2.8)$$

dove dQ e dL_e rappresentano rispettivamente il calore scambiato con l'ambiente esterno e il lavoro esterno netto attraverso la superficie di confine, dH rappresenta l'entalpia, z la quota potenziale e g la costante di gravitazione universale ($g \simeq 9,81 \text{ m/s}^2$). Poiché $dh = TdS_s + vdp$:

$$dL_e + TdS_s + v dp + \frac{dw^2}{2} + g dz \quad (1.2.9)$$

dove dS_s è la produzione entropica elementare e v il volume specifico. Un qualunque lavoro specifico, può essere espresso come prodotto di un volume specifico per un'opportuna pressione differenziale dp' , per omogeneità dimensionale. Questa variazione di pressione differisce dalla variazione che il fluido

subisce in moto. Sapendo che una qualsiasi pressione p può essere espressa in termini di peso specifico γ e altezza idrica h :

$$dL_e = v \, dp_e = v \, \gamma \, dh_e = g \, dh_e \quad (1.2.10)$$

Allo stesso modo per il lavoro di attrito:

$$dL_a = v \, dp_a = v \, \gamma \, dh_a = g \, dh_a \quad (1.2.11)$$

Se sostituiamo la (1.2.10) e la (1.2.11) nella (1.2.9) otteniamo:

$$dh_e + dh_a + \frac{dp}{\gamma} + \frac{dw^2}{2g} + dz = 0 \quad (1.2.12)$$

La (1.2.12) è detta equazione di Bernoulli generalizzata in forma differenziale e ha valenza energetica specifica (per unità di peso). I termini nella formula sono così nominati:

- **dh_e carico motore**, termine effettivo di scambio con l'esterno;
- **dh_a carico d'attrito**, termine di dissipazione;
- **$\frac{dp}{\gamma}$ carico piezometrico**, l'effettiva variazione di pressione del fluido dovuta al moto;
- **$\frac{dw^2}{2g}$ carico cinetico;**
- **dz carico gravitazionale**, variazione di quota geodetica.

Se la (1.2.12) viene integrata tra la sezione 1 e la sezione 2 si ottiene:

$$(h_e)_{1,2} + (h_a)_{1,2} + \int_1^2 \frac{dp}{\gamma} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + z_2 - z_1 = 0 \quad (1.2.13)$$

L'equazione caratterizzante il moto è così ridotta in termini di carichi differenziali, cioè in termini dimensionali si hanno delle lunghezze.

In caso di un condotto a pareti rigide, di sezione costante, orizzontale e attraversato da un fluido a regime permanente, cioè a carico motore e potenziale nullo, la (1.2.13) diventa:

$$(h_a)_{1,2} + \int_1^2 \frac{dp}{\gamma} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} = 0 \quad (1.2.14)$$

Se si ammettono trascurabili le variazioni di peso specifico rispetto alle variazioni di pressione, cioè si assume che il peso specifico sia costante, e la variazione di velocità nulla:

$$(h_a)_{1,2} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \quad (1.2.15)$$

La (1.2.15) esprime il carico d'attrito o in termini operativi la perdita di carico.

1.3 Calcolo delle cadute di pressione per attrito

1.3.1 Numero di Reynolds

Si consideri un condotto rettilineo di diametro D a pareti perfettamente lisce in cui scorre un fluido a velocità w , di densità ρ e viscosità μ . Il regime è definito laminare se le traiettorie del flusso sono rettilinee e il profilo di velocità è parabolico (Figura 1.4a). Il regime di flusso è invece turbolento quando le particelle non seguono traiettorie ordinate e il moto che ne risulta avviene in maniera caotica (Figura 1.4b).

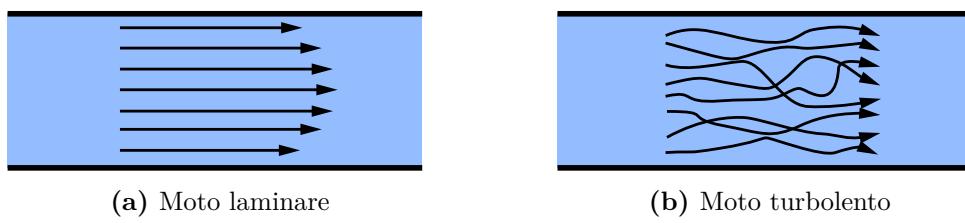


Figura 1.4: Regime di flusso monofase in condotta.

Reynolds fu il primo a definire che il tipo di moto dovesse dipendere non solo dalla velocità ma anche dalla densità e viscosità del fluido, oltre che alla geometria della condotta. Il numero di Reynolds è così definito:

$$Re = \frac{\rho w D}{\mu} \quad (1.3.1)$$

Il numero di Reynolds definisce il tipo di moto che si instaura in condotta:

- per $Re < 2000$ il moto in un condotto è laminare;
- per $2000 < Re < 10000$ si ha una regione di transizione;
- per $Re > 10000$ il moto in un condotto è completamente turbolento.

1.3.2 Fattore di attrito di Moody

Sia in condizioni di moto laminare che in condizioni di moto turbolento, la caduta di pressione totale dipende dal tipo di fluido, dal regime di moto e dalle caratteristiche della condotta. In breve, il carico di attrito dipende da parametri:

- **fisici** - μ e ρ - relativi ai fluidi in movimento;
- **cinematici** - w - caratterizzanti il trasporto di massa fluida;
- **geometrici** - D e ε - legati alla tubazione e alla scabrezza assoluta ε della parete interna della condotta.

Perciò si può affermare che:

$$\frac{\Delta p}{l} = f(\rho, \mu, w, D, \varepsilon) \quad (1.3.2)$$

dove l è la lunghezza della condotta. L'equazione di Darcy-Weisbach può essere definita sia in funzione delle perdite di carico piezometriche (1.3.3) sia in funzione delle cadute di pressione (1.3.4):

$$h_a = \lambda \frac{l}{D} \frac{w^2}{2g} \quad (1.3.3)$$

$$\Delta p_a = \lambda \frac{l}{D} \frac{\rho w^2}{2} \quad (1.3.4)$$

dove λ è detto fattore d'attrito di Moody o indice di resistenza. La perdita di carico corrispondente, per un certo valore λ , risulta proporzionale al carico

cinetico e alla lunghezza del condotto. In regime di moto laminare il fattore di attrito è proporzionale al solo coefficiente di Reynolds:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1.3.5)$$

In regime turbolento l'indice di resistenza è legata alla rugosità della parete. Il rapporto $\frac{\varepsilon}{D}$ è definito scabrezza relativa. La relazione funzionale equivalente è:

$$\lambda = f \left(Re, \frac{\varepsilon}{D} \right) \quad (1.3.6)$$

Sulla base dei risultati sperimentali al variare dei parametri del modello di flusso in condotta in regime turbolento, è stato costituito il diagramma di Moody (Figura 1.5). Gli andamenti all'interno di tale diagramma sono la rappresentazione grafica della correlazione di Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \ln \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (1.3.7)$$

Il fattore di attrito può essere espresso anche tramite il numero di Fanning f , adimensionale e definito come il rapporto tra gli sforzi di taglio e le forze di inerzia:

$$f = \frac{2\tau}{\rho w^2} \quad (1.3.8)$$

Il fattore di attrito di Moody è quattro volte il numero di Fanning:

$$\lambda = 4f \quad (1.3.9)$$

Blasius propone il calcolo del numero di Fanning a partire dal numero di Reynolds:

$$f = \frac{0,079}{Re^{0,25}} \quad (1.3.10)$$

La (1.3.10) è applicabile in condizione di tubi a pareti interne lisce (scabrezza nulla, $\varepsilon = 0$) e regime di flusso non totalmente turbolento ($Re < 10^5$).

1.3.3 Perdite di carico per un liquido

Una relazione approssimativa per la valutazione delle perdite di carico di liquidi in condotta è quella di Hazen-Williams. Questa relazione è valida

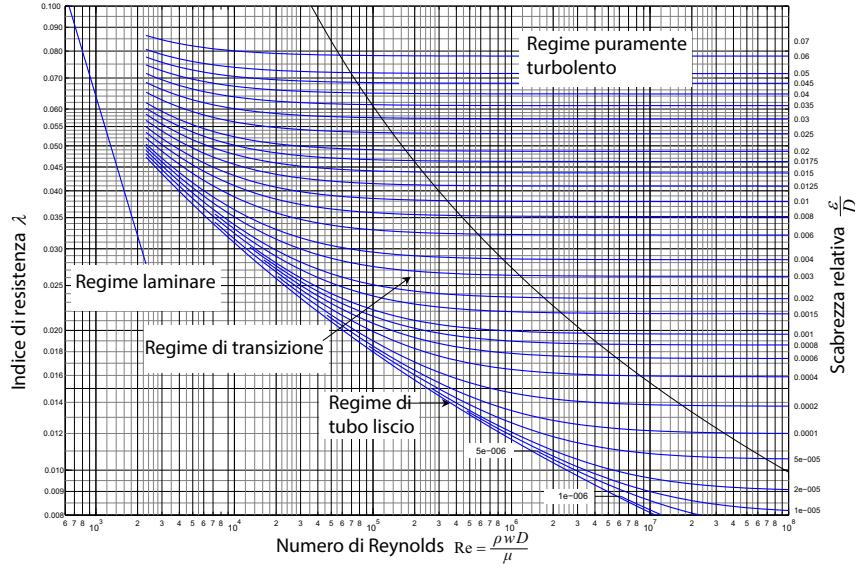


Figura 1.5: Diagramma di Moody per il calcolo del fattore di attrito in condotta.

solo per acqua in condizioni di regime turbolento a temperatura compresa tra i 4°C e 25°C.

$$\frac{h_a}{l} = \frac{10,65}{C^{1,85}} \frac{\dot{V}^{1,85}}{d^{4,87}} \quad (1.3.11)$$

dove \dot{V} è la portata volumetrica, la costante moltiplicativa numerica 10,65 non è adimensionale (ha le dimensioni di $s^{1,85}/m^{0,86}$) e la costante adimensionale C è un valore tabellato. L'equazione fornisce direttamente il valore delle perdite di carico distribuite per unità di lunghezza della tubazione in funzione della portata volumetrica e del diametro idraulico. Se ora esplicitiamo la (1.3.3) in funzione del diametro interno D , ponendo la portata volumetrica come $\dot{V} = w A$:

$$h_a = \lambda \frac{l}{D} \frac{w^2}{2g} \implies \frac{h_a}{l} = \frac{8f}{\pi^2 2g} \frac{\dot{V}^2}{D^5} \quad (1.3.12)$$

In entrambe le formulazioni (la forma generale delle perdite di carico e l'approssimazione di Hazen-Williams) si rileva che, a parità di portata, le perdite

Tipologia tubo	C
Tubi estremamente lisci	140
Tubi nuovi, acciaio o ghisa	130
Tubi in legno o calcestruzzo	120
Tubi in acciaio rivettato, nuovi	110
Tubi vecchi in ghisa, mattoni	100
Tubi in acciaio rivettato, vecchi	95
Tubi in acciaio corroso	80
Tubi in acciaio fortemente corroso	60

Tabella 1.1: Coefficienti C adimensionali per la formula di Hazen-Williams (Di Marco 2006).

di carico sono inversamente proporzionali al diametro della tubazione elevato ad un esponente prossimo a 5.

1.3.4 Perdite di carico per un gas

In condotte lunghe, il flusso di un gas è prossimo alle condizioni isotermiche. Le cadute di pressione in tali linee sono spesso grandi paragonate alla pressione in ingresso e il problema non può essere trattato tramite il modello di flusso di Darcy. Una soluzione accurata è data dall'equazione:

$$\dot{m}^2 = \left[\frac{A^2}{v_1 \left(\frac{\lambda l}{D} + 2 \ln \frac{p_1}{p_2} \right)} \right] \left[\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_1} \right] \quad (1.3.13)$$

dove \dot{m} è la portata massica, p_1 e p_2 sono le pressioni all'inizio e alla fine della condotta. Se esplicitiamo nella (1.3.13) il volume specifico in ingresso v_1 utilizzando l'equazione di stato di un gas reale:

$$p_1^2 - p_2^2 = ZRT \left(\frac{w}{A} \right)^2 \left(\lambda \frac{l}{D} + 2 \ln \frac{p_1}{p_2} \right) \quad (1.3.14)$$

dove Z , è il fattore di comprimibilità del gas, R è la costante universale dei gas perfetti e T la temperatura. Si formulino le seguenti assunzioni:

- flusso di gas a condizioni isotermiche;
- assenza di lavoro meccanico in ingresso e uscita;
- regime permanente;
- gas perfetto;
- velocità come rappresentazione della velocità media nella sezione trasversale;
- coefficiente d'attrito λ costante;
- condotta dritta e orizzontale

La (1.3.13) e la (1.3.14) possono essere scritte semplificate in:

$$\dot{m}^2 = \left[\frac{D A^2}{v_1 \lambda l} \right] \left[\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_1} \right] \quad (1.3.15)$$

$$p_1^2 - p_2^2 = Z_m R T \left(\frac{w}{A} \right)^2 \left(\lambda \frac{l}{D} \right) \quad (1.3.16)$$

Possono essere utilizzate tre diverse forme semplificate per il calcolo delle portate di gas in condotta, a seconda delle specifiche tecniche dell'infrastruttura.

Equazione di Weymouth

L'equazione di Weymouth è raccomandata per condotte con diametro piccolo (generalmente sotto i 12") e lunghezza limitata (sotto i 30 km) all'interno delle batterie di produzione o per le linee di raccolta secondarie, pressione medio-alta (compresa tra 7 bar e 70 bar) in regime di moto turbolento (alto valore del numero di Reynolds).

$$\dot{V}_h = 2,61 \times 10^{-8} D_{mm}^{2,667} \left[\left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{\rho_r l_{km}} \right) \frac{288}{T_1} \right]^{0.5} \quad (1.3.17)$$

dove \dot{V}_h è la portata espressa in Smc^1/h , ρ_r è la densità relativa, D_{mm} è il diametro interno della condotta espresso in mm, l_{km} è la lunghezza della condotta espressa in km.

Equazione di Panhandle

L'equazione di Panhandle è indicata per condotte di grande diametro (pari o sopra i 12"), condotte lunghe (più di 70 km) e per valori del numero di Reynolds moderati.

$$\dot{V}_h = 2,044 \times 10^{-8} \varphi D_{mm}^{2,6182} \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{l_{km}} \right)^{0,5394} \quad (1.3.18)$$

dove φ rappresenta il fattore di efficienza del flusso ($\varphi \leq 1$, ha valore unitario in caso di nuove condotte)

Equazione di Spitzglass

Esistono due versioni di questa equazione: ad alta o bassa pressione. L'equazione di Spitzglass relativa a condotte a bassa pressione è:

$$\dot{V}_h = 9,50 \left[\frac{(p_1 - p_2) D_{mm}^5}{l_{mm} \rho_r (1 + 0,09144/D_{mm} + 1,1811 D_{mm})} \right]^2 \quad (1.3.19)$$

1.3.5 Perdite di carico concentrate

Il fluido, lungo il suo percorso in condotta, può incontrare brusche variazioni di sezione, direzione o ostruzioni come filtri o rubinetti. Il calcolo delle resistenze puntuali è difficilmente calcolabile in modo analitico e ci si basa maggiormente su dati puramente sperimentali. Tutte le resistenze relative a diversi elementi tipici della condotta sono espresse in funzione del carico cinetico:

$$\Delta p' = \gamma \frac{w^2}{2g} f' \quad (1.3.20)$$

¹Standard metri cubi, quantità di gas contenuta in un 1 m³ a condizioni standard di pressione ($p = 101325$ Pa, pressione ambientale) e di temperatura ($T = 288,15$ K, 15°C)

dove f' assume valori diversi a seconda del tipo di singolarità. La somma di perdite di carico concentrate e distribuite fornisce la caduta di pressione totale per una generica condotta percorsa da un fluido.

1.4 Moto multifase

In termodinamica classica si definisce fase come uno stato macroscopico della materia omogeneo per struttura fisica e composizione chimica. I flussi bifase sono caratterizzati dalla presenza di due fasi e rappresentano il caso più semplice di flusso multifase o multicomponente. Nei flussi bifase, l'iterazione tra le due fasi porta alla formazione di particolari regimi di flusso. Il verificarsi di un determinato regime dipende dalla portata, dalle caratteristiche fisiche e dalle condizioni termodinamiche delle due fasi e dalle caratteristiche fisiche dell'impianto.

1.4.1 Regime di flusso in condotta

L'inclinazione della condotta incide fortemente sulla formazione dei diversi regimi di flusso: in caso di tubazioni verticali, la forza gravitazionale agisce nella stessa direzione della forza inerziale, quindi lungo l'asse della condotta. In condotte verticali si hanno quindi regimi pseudo-simmetrici rispetto l'asse della condotta, in tubazioni orizzontali la fase liquida e la fase gassosa tendono a disporsi rispettivamente sulla parte inferiore e superiore.

1.4.1.1 Condotte verticali

I regimi di flusso bifase per condotte verticali sono così classificati (Figura 1.6):

- flusso a bolle;
- flusso a *slug*;
- flusso a *churn* o agitato;

- flusso anulare misto.

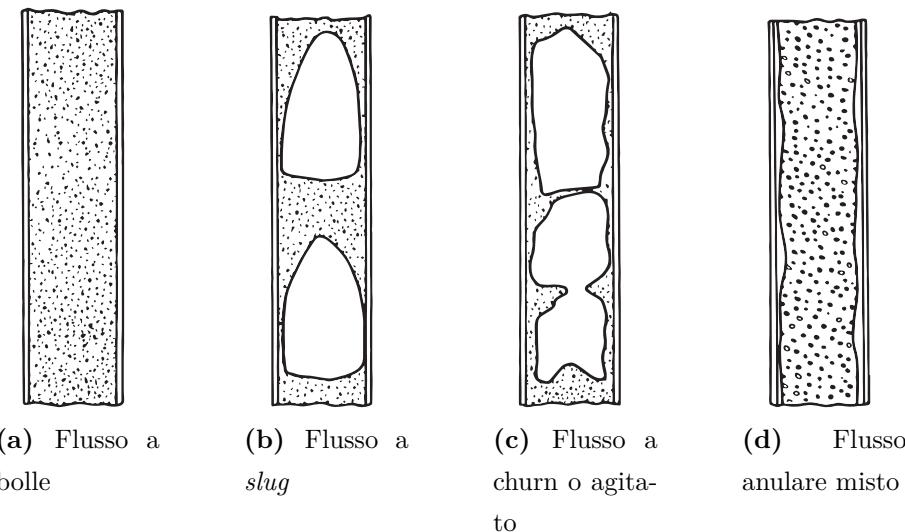


Figura 1.6: Regimi di flusso bifase in condotte verticali (Lake et al. 2006).

Per comprendere nel dettaglio i vari regimi che si possono instaurare in condotta si fa riferimento alla mappa dei regimi di flusso bifase avvallata da Griffith et al. (1984) per condotte verticali (Figura 1.7).

Per basse velocità superficiali della fase gassosa, avviene in condotta il solo regime a bolle (Figura 1.6a). In questo regime la fase liquida si muove a velocità uniforme mentre le bolle di gas sono più veloci o più lente a seconda del loro diametro. Se si incrementa la velocità della fase gassosa, questa tenderà a viaggiare di pari passo alla fase liquida, creando così il regime a *slug* (Figura 1.6b) e il regime a *churn* o anche detto agitato (Figura 1.6c), dove ormai l'effetto della fase gassosa è predominante rispetto alla fase liquida. Nel regime anulare misto (Figura 1.6d) la fase gassosa è continua e la fase liquida è dispersa nel gas oppure disposta sulle pareti interne.

1.4.1.2 Condotte orizzontali

I regimi di flusso in condizioni di condotta orizzontale possono essere così classificati (Figura 1.8):

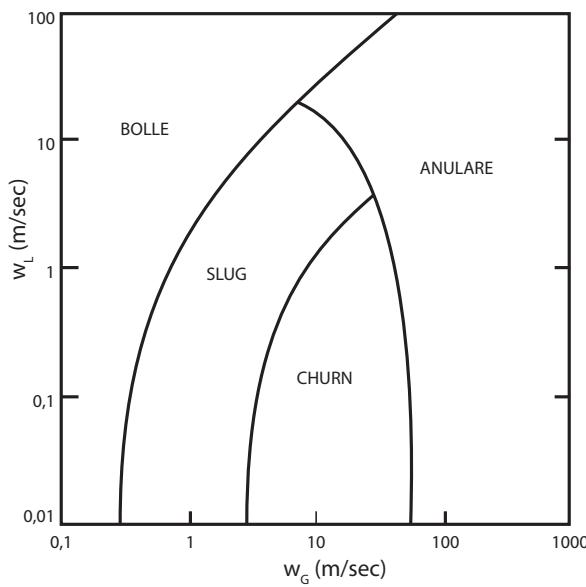


Figura 1.7: Mappa per regimi di flusso bifase per condotte verticali (Griffith et al. 1984).

- flusso stratificato;
- flusso a onde;
- flusso a *plug* o a bolle allungate;
- flusso a *slug*;
- flusso anulare;
- flusso a bolle disperse.

Per la determinazione dei diversi regimi di flusso bifase aria-acqua si fa riferimento alle mappe per condotte orizzontali proposte da Griffith et al. (1984), Baker (1954) e Taitel et al. (1976).

Griffith et al. (1984)

Il regime di flusso è definito tramite la velocità superficiale w_i , legata alla portata volumetrica della fase i-esima attraverso una generica sezione A della

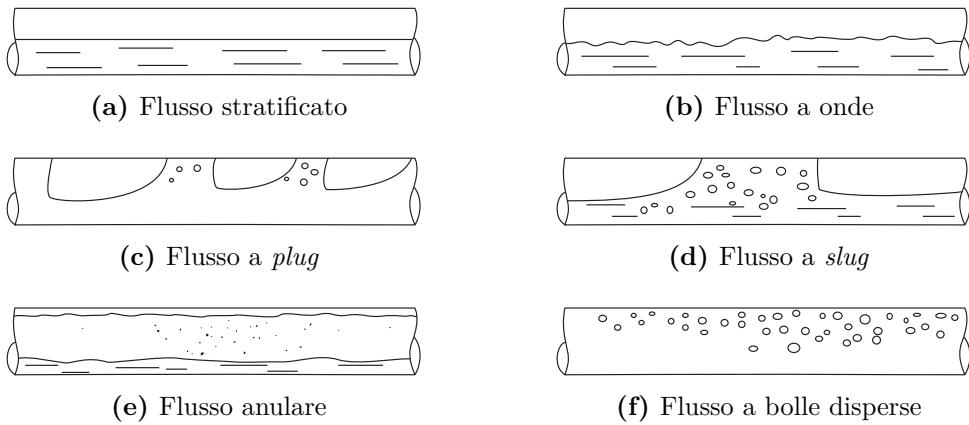


Figura 1.8: Regimi di flusso bifase in condotte orizzontali (Lake et al. 2006).

condotta. Si ha quindi:

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{V}_g}{A} \quad (1.4.1)$$

$$w_l = \frac{\dot{V}_l}{A} \quad (1.4.2)$$

dove i pedici g e l fanno riferimento alla fase gassosa o liquida. Le linee continue interne rappresentano la transizione tra i diversi regimi.

Per basse velocità superficiali della fase liquida si verificano flussi stratificati a interfaccia liscia (Figura 1.8a), a onda (Figura 1.8b) e anulare misto (Figura 1.8e) a seconda della velocità superficiale del liquido. Questi tre regimi fanno parte della categoria dei flussi separati: le due fasi appaiono come due flussi continui senza apparente iterazione. Il flusso stratificato e quello a onde sono caratterizzati dallo scorrimento della fase liquida nella parte inferiore della condotta, in quello anulare la fase liquida si dispone lungo le pareti interne della condotta. All'aumentare della velocità superficiale della fase liquida, si osserva un maggiore miscelamento delle due fasi e si verificano flussi a *slug* o a bolle allungate (Figura 1.8d) o flussi a *plug* (Figura 1.8c). La differenza tra questi due regimi è sottile: nel flusso a *slug* sono disperse numerose bollicine di gas nella fase liquida, al contrario del flusso a *plug*. Ad alte velocità superficiali della fase liquida si verifica il flusso a bolle (Figura 1.8f), caratterizzato dalla presenza di bolle di gas disperse nella fase liquida.

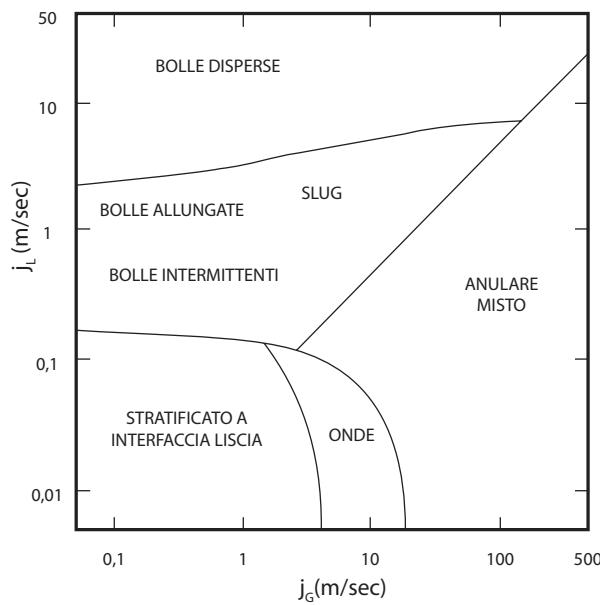


Figura 1.9: Mappa di Griffith et al. (1984) per regimi di flusso bifase per condotte orizzontali.

Baker (1954)

La mappa di Baker (1954) per condotte orizzontali con flusso bifase (Figura 1.10) è stata proposta originariamente sia nel Sistema Internazionale che nel sistema consuetudinario statunitense. Per l'utilizzo della mappa devono essere determinati i parametri adimensionali Λ e Ψ e la velocità di massa o flusso di massa j_i , la massa della fase i -esima che attraversa una generica sezione trasversale A della condotta:

$$j_g = \frac{\dot{m}_g}{A} = \frac{\rho_g w_g A}{A} = \rho_g w_g \quad (1.4.3)$$

$$j_l = \frac{\dot{m}_l}{A} = \frac{\rho_l w_l A}{A} = \rho_l w_l \quad (1.4.4)$$

dove j_g e j_l sono (in modulo) la velocità di massa del gas e del liquido. I parametri adimensionali Λ e Ψ sono definiti da:

$$\Lambda = \left(\frac{\rho_g}{\rho_{aria}} \frac{\rho_l}{\rho_{acqua}} \right)^{1/2} \quad (1.4.5)$$

$$\Psi = \left(\frac{\sigma_{acqua}}{\sigma} \right) \left[\left(\frac{\mu_L}{\mu_{acqua}} \right) \left(\frac{\rho_{acqua}}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (1.4.6)$$

dove ρ_g , ρ_l , μ_L e σ sono proprietà proprie del fluido. I termini noti, quindi le proprietà di riferimento sono:

- $\rho_{acqua} = 1000 \text{ kg/m}^3$;
- $\rho_{aria} = 1,23 \text{ kg/m}^3$;
- $\mu_{acqua} = 0,001 \text{ N sec/m}^2$;
- $\sigma_{acqua} = 0,072 \text{ N/m}$.

I valori sugli assi x e y sono così identificati. L'intersezione sulla mappa fornisce il regime bifase che si instaura nella condotta sulla base del modello.

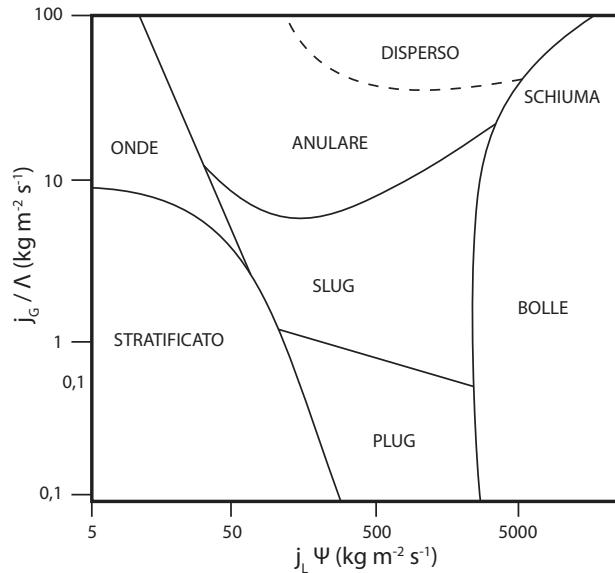


Figura 1.10: Mappa di Baker (1954) per regimi di flusso bifase per condotte orizzontali.

Taitel et al. (1976)

Nel lavoro di Taitel et al. (1976) (Figura 1.11) si propone una mappa per condotte orizzontali che nasce dalla combinazione di analisi analitiche e selezione empirica di numerosi parametri di riferimento. La mappa usa il parametro di Martinelli χ , il numero di Froude del gas Fr_g e i parametri T e K .

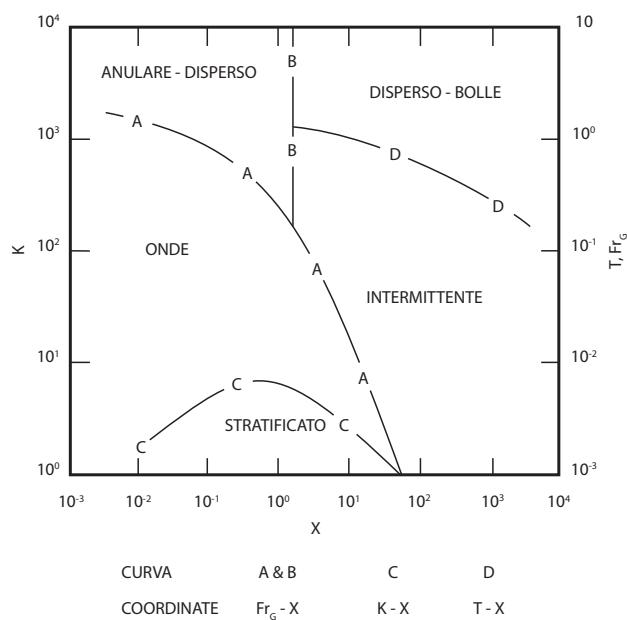


Figura 1.11: Mappa di Taitel et al. (1976) per regimi di flusso bifase per condotte orizzontali. Gli assi di riferimento cambiano a seconda della curva considerata, come descritto nel pannello al di sotto del grafico.

Il parametro di Martinelli è dato dalla radice quadrata del rapporto tra i gradienti di pressione del liquido e del gas:

$$\chi = \left[\frac{(dp/dl)_L}{(dp/dl)_G} \right]^{1/2} \quad (1.4.7)$$

Si ricorda che il gradiente di pressione per unità di lunghezza è dato dalla derivata dell'equazione di Darcy-Weisbach (1.3.4) in funzione della caduta di pressione lungo la direzione della condotta:

$$\Delta p_{a,k} = \lambda_k \frac{l}{D} \frac{\rho_k w_k^2}{2} \implies \left(\frac{dp}{dl} \right)_k = -\frac{\lambda_k}{D} \frac{\rho w^2}{2} = -\frac{\lambda_k j_k^2}{\rho_k D} \quad (1.4.8)$$

Il numero di Froude è un gruppo adimensionale e rappresenta la frazione liquida di un fluido. Dal punto di vista analitico mette in relazione forza di inerzia con la forza peso. Per la fase gassosa vale:

$$Fr_g = \frac{j_g}{[\rho_g(\rho_l - \rho_g)D g]^{1/2}} \quad (1.4.9)$$

Il parametro T è definito come:

$$T = \left[\frac{|(dp/dl)_L|}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (1.4.10)$$

Il parametro K invece è funzione del numero di Froude del gas e del numero di Reynolds del liquido:

$$K = Fr_g Re_L^{1/2} \quad (1.4.11)$$

Caratteristica principale di questa mappa di regime è l'impiego di diverse coordinate, in funzione dei parametri trovati, a seconda della curva a cui si fa riferimento. Dapprima si calcolano quindi il parametro di Martinelli χ e il numero di Froude del gas Fr_g . Se le coordinate del punto trovato ricadono nella parte superiore della curva A, rappresentata rispetto al sistema di coordinate $Fr_g - \chi$, il regime sarà quindi anulare. Nel caso in cui il punto si collochi al di sotto della curva viene calcolato il parametro K . Facendo riferimento alla curva C e quindi al sistema di coordinate $K - \chi$ il regime sarà a onde o stratificato con interfaccia liscia se il punto trovato è rispettivamente nella parte superiore o inferiore della curva C. Se il punto ricade nella parte superiore a destra del grafico, si fa riferimento alla curva D, quindi al sistema di coordinate $T - \chi$. Il regime sarà a bolle disperse se il punto trovato si trova al di sopra della curva D, viceversa il regime sarà di natura intermittente o a *slug*.

Tutti i modelli fin qui presentati sono stati sviluppati per flussi bifase in condizioni adiabatiche. Tuttavia questi modelli, tramite accorgimenti di natura analitica, possono rispondere anche a condizioni diabatiche, cioè ipotizzando la condotta come sistema aperto in cui avviene scambio di calore con l'esterno. Lo studio dei regimi di flusso può quindi essere esteso, per esempio, negli impianti di refrigerazione oppure negli scambiatori termici.

1.4.2 Cadute di pressione per attrito di un flusso bifase

Si può semplificare lo studio del moto di un fluido bifase se si assume che le fasi siano ben miscelate fra loro, quindi come un unico fluido monofase. Il modello omogeneo può essere applicato quando le fasi sono fortemente interdisperse tra loro, cioè quando entrambe hanno velocità superficiali sostenute. Le perdite di carico totali Δp_{tot} sono la somma delle perdite di carico statiche o gravitazionali Δp_s , le perdite di carico della quantità di moto Δp_{mom} e le perdite di carico per attrito Δp_a :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_{mom} + \Delta p_a \quad (1.4.12)$$

La perdita di carico statico per un fluido bifase omogeneo è:

$$\Delta p_s = \rho_h g z \quad (1.4.13)$$

dove z è la differenza di quota geodetica tra le sezioni di ingresso e uscita della condotta, o meglio l'altezza della condotta. Per densità omogenea ρ_h si intende:

$$\rho_h = \rho_l(1 - \xi_h) + \rho_g \xi_h \quad (1.4.14)$$

Si determina la frazione di vuoto ξ_h in funzione del titolo di vapore x :

$$\xi_h = \left[1 + \left(\frac{w_g}{w_l} \frac{(1-x)\rho_g}{x\rho_l} \right) \right]^{-1} \quad (1.4.15)$$

dove il rapporto w_g/w_l è detto rapporto di slittamento e ha valore unitario nel caso di flussi omogenei. Il gradiente di pressione della quantità di moto per unità di lunghezza del condotto è:

$$\left(\frac{dp}{dl} \right)_{mom} = \frac{d(j_{tot}/\rho_h)}{dz} \quad (1.4.16)$$

Il punto cruciale del calcolo delle cadute di pressione per un flusso bifase risiede nella stima del termine di attrito, in questo frangente rappresentato dal numero di Fanning f . Se si esprime la (1.3.4) in funzione del numero di Fanning f_{tot} per un flusso bifase, in funzione del flusso di massa j_{tot} :

$$\Delta p_a = \frac{2 f_{tot} j_{tot}^2}{\rho_{tot}} \frac{l}{D} \quad (1.4.17)$$

Si può esprimere il numero di Fanning tramite la (1.3.10), il numero di Reynolds per mezzo della (1.3.1). Come viscosità, parametro utile al calcolo del numero di Reynolds, può essere scelta quella della fase liquida oppure una media pesata in base al titolo di vapore x :

$$\mu_{tot} = x \mu_G + (1 + x) \mu_L \quad (1.4.18)$$

È importante acquisire le basi della fluidodinamica multifase per capire come le iterazioni tra le diverse fasi e le perdite di carico definiscano il flusso che si instaura in condotta. L'ingegneria petrolifera ha affinato negli anni i modelli interpretativi, così da avvicinare le stime di produzione di un pozzo ai trend reali. In particolar modo, la corretta interpretazione del moto multifase per i pozzi a gas determina la tipologia e la configurazione di sistemi per l'aumento di portata o la diminuzione delle perdite di carico. Si intuisce quindi che l'aumento delle performance è legato alla veridicità del modello calcolato. Nel prossimo capitolo sono trattati i problemi di un pozzo a gas legati a condizioni di flusso multifase e le tecnologie oggi utilizzate per ovviare al calo di rendimento nel tempo.

Capitolo 2

Applicazioni di schiumogeno per l'ottimizzazione della produzione di gas naturale

Per *Gas Well Deliquification* o *Gas Well Dewatering* (GWD) si intende l'insieme delle tecnologie e delle applicazioni utili alla rimozione di acqua o condensati in fase produttiva da un pozzo a gas. Nello specifico il concetto di GDW racchiude tutti gli strumenti utili nel combattere il fenomeno del *liquid loading*, definito come l'accumulo di acqua in pozzo e l'impossibilità di rimuoverla. Le tecnologie impiegate per lo spiazzamento dei liquidi a fondo pozzo sono numerose e sono in continua evoluzione per garantire migliori performance e affidabilità. Nell'ultimo decennio gli schiumogeni sembrano rappresentare una scelta concreta per controllare il carico idrostatico di fondo pozzo e presentano notevoli vantaggi rispetto alle tecnologie già esistenti (Stanculescu et al. 2014). In questo capitolo sono descritte le cause e le conseguenze del *liquid loading* e le principali tecnologie impiegate oggi per la riduzione e controllo del battente idrostatico. Particolare attenzione è dedicata all'impiego di tensioattivi liquidi o *foamer*, descrivendo le proprietà fisico-chimiche, le procedure operative per il loro impiego e controllo tramite l'uso di antischiuma o *defoamer*.

2.1 Liquid loading

2.1.1 Ciclo di vita di un pozzo a gas

Nel paragrafo 1.4.1.1 si è discusso dei diversi regimi di flusso bifase per condotte verticali. Un pozzo a gas può presentare tutti i regimi di flusso: in Figura 2.1 è possibile comprendere graficamente l'evoluzione del pozzo durante il suo ciclo di vita. La distribuzione delle varie fasi in pozzo si evolve nel corso della vita produttiva. Inizialmente il gas è fase dominante e il pozzo ha forza sufficiente per trascinare tutto il liquido presente sul fondo. Ad alte velocità superficiali del gas corrisponde un regime anulare misto: la fase liquida è interdispersa nella fase gassosa. Con il diminuire della velocità del gas nel tempo, la fase liquida comincia a precipitare e a depositarsi sul fondo, ostacolando la normale produzione di gas.

2.1.2 Problemi legati al *liquid loading*

Il *liquid loading* porta a un regime di flusso a *slug* e a una produzione di gas discontinua e inferiore. Se il gas ha energia sufficiente a rimuovere i liquidi presenti a fondo pozzo, la portata del gas risponde in modo corretto alla stima di produzione rispetto al tempo di vita del pozzo, definita tramite l'analisi della curva di declino (*Decline Curve Analysis*, DCA), visibile sempre in Figura 2.1.

In caso di aumento del battente idrostatica, il pozzo produce gas in quantità minore rispetto alle stime effettuate. Raggiunto uno stato critico di produzione, il giacimento non ha più energia sufficiente per lo spiazzamento del pozzo e l'effetto combinato di precipitazione di liquidi a fondo pozzo e diminuzione fisiologica della pressione di giacimento porta all'innalzamento della colonna idrostatica. L'aumento dell'altezza della colonna di liquido può quindi interferire sulla produzione, sancendo così il termine del ciclo di vita del pozzo stesso.

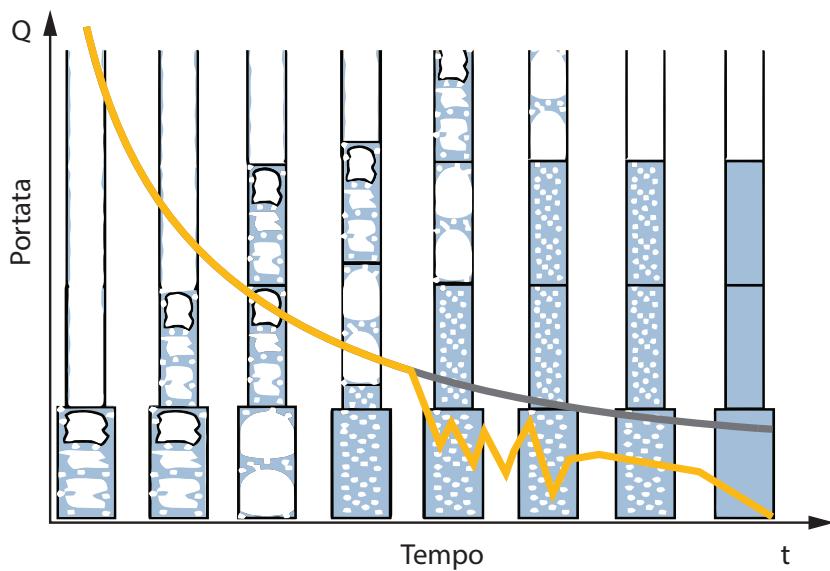


Figura 2.1: Schematizzazione del ciclo di un pozzo a gas, combinata con l’analisi della curva di declino (Lea et al. 2011).

2.1.3 Sorgenti di liquidi per un pozzo a gas

Nella maggior parte dei pozzi la produzione di gas è associata a produzione di liquidi. Questi liquidi possono essere acqua, vapore acqueo condensato o idrocarburi condensati. I liquidi prodotti in pozzo dipendono dalle condizioni e dal tipo di giacimento in questione. Le principali cause possono essere:

- **water coning:** fenomeno locale di deformazione del contatto gas-acqua causato dalla variazione di pressione indotta dalla produzione. Il rischio è maggiore in presenza di pressioni capillari elevate, a causa delle quali può esistere una estesa zona di frangia in cui sono mobili sia l’acqua che gas, con mobilità dell’acqua molto vicina a quella del gas;
- **innalzamento dell’acquifero:** in caso di acquifero attivo, il battente idrostatico raggiunge gli spari con il diminuire della pressione di giacimento;
- **vapore acqueo condensato:** poiché nei giacimenti è presente acqua di strato, il gas naturale è associato a vapore acqueo. Se le condizioni

di pressione e temperatura sono tali da scendere al di sotto del punto di rugiada, il vapore acqueo condensa e contribuisce al quantitativo totale di acqua di produzione;

- **idrocarburi condensati:** come il vapore acqueo, alcuni idrocarburi pregiati possono passare dallo stato gassoso allo stato liquido con il variare delle condizioni di pressione e temperatura;
- ***fingering* o *canalizzazioni*:** specialmente in pozzi completati a foro scoperto o in alcuni casi di spari multipli, è possibile che dei liquidi possano confluire nel pozzo per vie preferenziali. Si verifica spesso nel caso di ammassi rocciosi particolarmente fratturati (e.g. carbonati fratturati).

2.1.4 Velocità critica

La velocità terminale è definita come la velocità di caduta di un corpo libero (particelle liquide) in un mezzo fluido (gas naturale) sotto l'influenza della forza di gravità. La velocità critica è legata alla velocità terminale delle particelle di liquido e la differenza tra le due grandezze rappresenta l'incremento utile per lo spiazzamento del liquido dal pozzo. Il primo a creare un modello sperimentale inerente al trascinamento continuo di liquido fu Turner et al. (1969). L'equazione teorica per la velocità critica w_c per il trascinamento verticale di una goccia:

$$w_c = 1,593 \frac{\sigma(\rho_l - \rho_g)^{1/4}}{\rho_g^2} \quad [\text{ft/sec}] \quad (2.1.1)$$

dove σ è la tensione superficiale, ρ_g e ρ_l sono la densità rispettivamente del gas e del liquido.

Poiché in campo le condizioni variano molto rispetto al modello teorico, l'autore fornisce due equazioni relative al trascinamento di acqua ($w_{c,w}$) o condensati ($w_{c,cond}$), in funzione della pressione p :

$$w_{c,w} = 5,304 \frac{(67 - 0,0031p)^{1/4}}{\sqrt{0,0031p}} \quad [\text{ft/sec}] \quad (2.1.2)$$

$$w_{c,cond} = 4,03 \frac{(45 - 0,0031p)^{1/4}}{\sqrt{0,0031p}} \quad [\text{ft/sec}] \quad (2.1.3)$$

Dalla (2.1.2) e la (2.1.3) si ricava il valore della portata critica giornaliera:

$$\dot{V}_{c,giorrno} = \frac{3,06 w_c p A}{T Z_m} \quad [\text{MMft}^3/\text{giorno}] \quad (2.1.4)$$

dove w_c fa riferimento o alla velocità critica per acqua o condensati. Nel caso in cui siano presenti sia acqua che condensati, per il calcolo di w_c si fa riferimento alla sola (2.1.2). Tutte i parametri e le variabili del modello sono espressi nel sistema consuetudinario statunitense.

Negli anni successivi la ricerca ha portato alla creazione di ulteriori modelli sempre più raffinati: Coleman et al. (1991) utilizza il modello di Turner et al. ma lo convalida per pressioni di testa pozzi sopra i 35 bar, Li et al. (2001) crea un modello basato sulla forma appiattita delle particelle liquide, Nosseir et al. (1997) formula un modello che si adatta alle condizioni di flusso.

2.1.5 NODAL* analysisTM

La NODAL* analysisTM è un marchio Schlumberger ed è uno strumento analitico utile per valutare le performance di produzione di un pozzo. La NODAL* analysisTM viene impiegata per la progettazione del completamento del pozzo, considerando le caratteristiche del sistema produttivo quali afflusso, eventuali restringimenti o limiti generici. La NODAL* analysisTM si svolge tramite la definizione delle seguenti curve:

- **Inflow Production Relationship (IPR):** curva empirica, valuta le potenzialità del reservoir tramite la portata massima o AOF (*Absolute Open Flow*);
- **Vertical Lift Performance (VLP):** definita la dimensione del tubino di produzione, la lunghezza (profondità) il rapporto gas-liquido, la curva esprime la pressione a fondo pozzo in funzione della portata e della pressione a testa pozzo.

La produttività del pozzo si ottiene dall'intersezione dell'IPR con la VLP. Il punto trovato viene definito punto operativo ottimale, dove i valori di pressione e portata sono uguali in ambo le curve. Se si traccia sullo stesso grafico il valore di portata critica (Figura 2.2), si può stabilire se le condizioni operative ottimali impediscono la precipitazione della fase liquida a fondo pozzo. Se il punto di intersezione tra l'IPR e la TPR si trova a destra della curva relativa alla velocità critica, il pozzo ha energia sufficiente per trascinare interamente la fase liquida, altrimenti si incorre nel fenomeno di *liquid loading*.

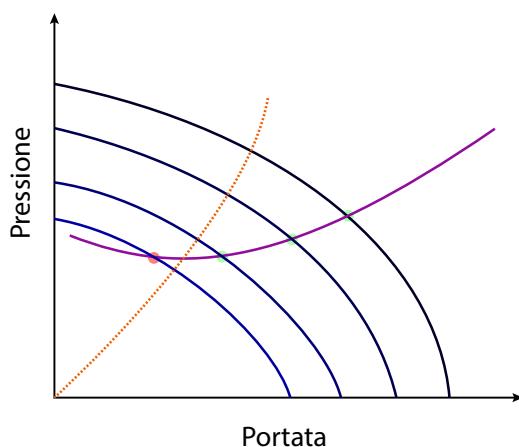


Figura 2.2: Schematizzazione dell'analisi nodale combinata alla portata critica di trascinamento.

2.2 Sistemi di sollevamento artificiale per il Gas Well Deliquification

L'industria del gas utilizza numerosi metodi per la rimozione di liquidi dai pozzi. Qui di seguito sono presentati i metodi più utilizzati e ormai consolidati nel tempo con particolare attenzione agli schiumogeni a cui è dedicata una sezione a parte. Oyewole et al. (2008) classifica i sistemi di sollevamento artificiale in:

- **a energia del giacimento:** qui definiti a energia interna, i sistemi non aumentano direttamente l'energia del giacimento, bensì agiscono sui parametri che caratterizzano il trascinamento del liquido in pozzo;
- **a energia esterna:** sistemi a fondo pozzo che agiscono indipendentemente dall'energia residua del giacimento.

Le *velocity string*, i compressori, i plunger e gli schiumogeni sono sistemi di sollevamento artificiale a energia interna, pompe e iniezione di fluidi sono invece sistemi a energia esterna.

2.2.1 Velocity string

La *velocity string* è costituita da un tubino di produzione con diametro inferiore rispetto a quello già presente in pozzo. Il restringimento della sezione di produzione provoca un aumento della velocità del flusso in condotta e il superamento del valore della velocità critica. L'applicazione può avvenire su un tratto specifico del pozzo (Figura 2.3a) oppure su tutta la sua lunghezza (Figura 2.3b).

L'installazione della *velocity string* è generalmente molto economica rispetto ad altri sistemi di sollevamento artificiale, visto che l'applicazione può avvenire anche tramite *coiled tubing*¹. Tuttavia la progettazione deve avvenire con particolare cautela, visto che il restringimento della sezione di produzione si traduce non solo in termini di aumento di velocità, ma anche di aumento delle perdite di carico per attrito. La *velocity string* non è considerata una soluzione definitiva per il GWD, dal momento che il dimensionamento ideale del tubino di produzione ausiliario cambia con l'evoluzione delle condizioni del giacimento.

¹Prodotti tubolari continui a sezione limitata, fabbricati in lunghezza e avvolti attorno a una bobina di raccolta (International Coiled Tubing Association et al. 2014)

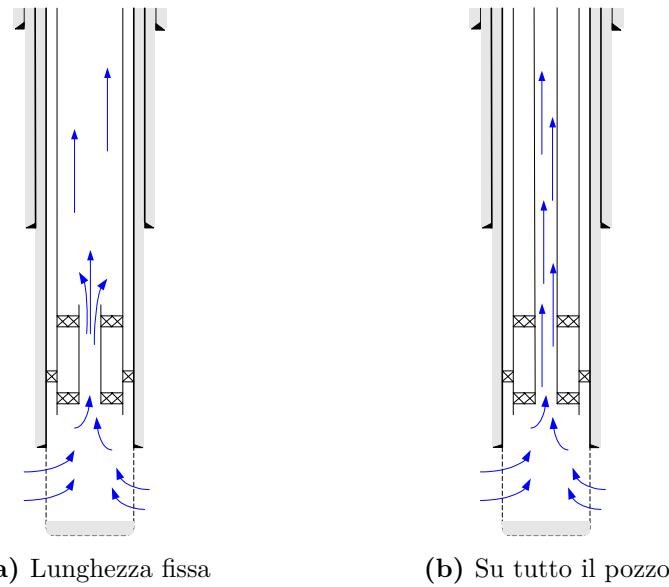


Figura 2.3: Schema di applicazione della *velocity string* (Arachman et al. 2004).

2.2.2 Compressione

Possono essere impiegati dei compressori di testa pozzo per diminuire la pressione in prossimità della superficie. La modalità di compressione può essere a opera di un singolo compressore (Figura 2.4) o di un sistema di più compressori.

Una minore pressione a testa pozzo porta all'aumento dell'afflusso di gas dal giacimento. L'aumento di portata è associato all'aumento della velocità del gas, raggiungendo così valori al di sopra della velocità critica. Il dimensionamento dell'impianto di compressione si basa sulla pressione di aspirazione e la pressione di mandata, ovvero dal rapporto di compressione. È importante tenere presente che una minima variazione delle pressioni di aspirazione o di mandata può aumentare in maniera significativa la potenza richiesta dal compressore. La compressione e la riduzione della pressione a testa pozzo sono generalmente le prime soluzioni impiegate per il sollevamento artificiale. L'installazione dei compressori può avvenire durante il ciclo di vita del pozzo

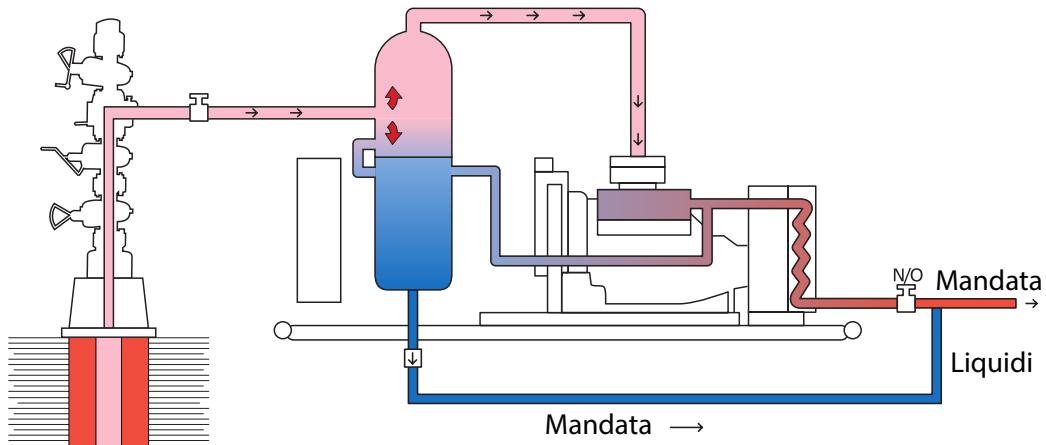


Figura 2.4: Layout semplificato del GasJack™, copressore singolo utilizzato per operazioni di compressione della testa pozzo (Garner et al. 2009).

senza evidenti segnali di *liquid loading*: la diminuzione di pressione consente di lavorare in condizioni migliori, aumentando le performance generali e quindi la produzione di gas giornaliera. La compressione può anche considerarsi un sistema di sollevamento artificiale ausiliario: un compressore può interfacciarsi con altre soluzioni come agenti surfattanti, *gas lift*, plunger o *velocity string*, aumentando in modo significativo l'efficacia di spiazzamento dei liquidi a fondo pozzo.

2.2.3 Plunger

I plunger sono dei dispositivi installati all'interno del pozzo per la rimozione meccanica di liquidi e altri agenti contaminanti. Il plunger è un pistone tuffante che viaggia liberamente dal fondo pozzo alla superficie, spinto da una pressione che deve essere sufficiente a trascinare sia il dispositivo che i fluidi accumulati. La produzione di gas con l'installazione di un plunger risulta discontinua, legata alla ciclicità dello strumento che deve percorrere in entrambe le direzioni tutta la lunghezza del pozzo. Come si può vedere nella Figura 2.6 l'applicazione di un plunger in pozzo richiede determinata strumentazione di superficie (valvole) e di fondo pozzo (plunger e meccanismo

a molla). Una tipica installazione convenzionale è organizzata nel seguente modo:

- **bumper a molla**, utile a ricevere il plunger a fondo pozzo e evitare danni dovuti all'impatto a terra;
- **ricevitore di superficie**, blocca il plunger una volta giunto in superficie e consente il deflusso del gas in condotta;
- **valvola motorizzata di superficie**, controllata elettronicamente, apre e chiude il pozzo quando necessario;
- **sensore elettronico di superficie**, si attiva quando il plunger giunge in superficie;
- **controller elettronici**, con ciclicità impostata da operatore, gestisce tutte le operazioni di produzione e registra dati in continuo.

Come già detto, l'applicazione di un plunger convenzionale trasforma la produzione da continua a ciclica, caratterizzata quindi da *shut-in* programmati per far tornare il plunger alla posizione originaria e permettere al pozzo, in caso di bisogno, di raggiungere una pressione tale da poter trascinare il plunger assieme alla colonna di fluido presente. La Figura 2.6 mostra un generico ciclo di produzione convenzionale:

- (a) plunger a fondo pozzo con liquido al di sopra, valvola di superficie chiusa;
- (b) apertura della valvola di superficie e risalita del plunger assieme alla colonna liquida;
- (c) fase produttiva del pozzo in assenza di cadute di pressione dovute a *liquid loading*;
- (d) riaccumulo di fluido a fondo pozzo;
- (e) chiusura del pozzo e discesa del plunger a fondo pozzo.

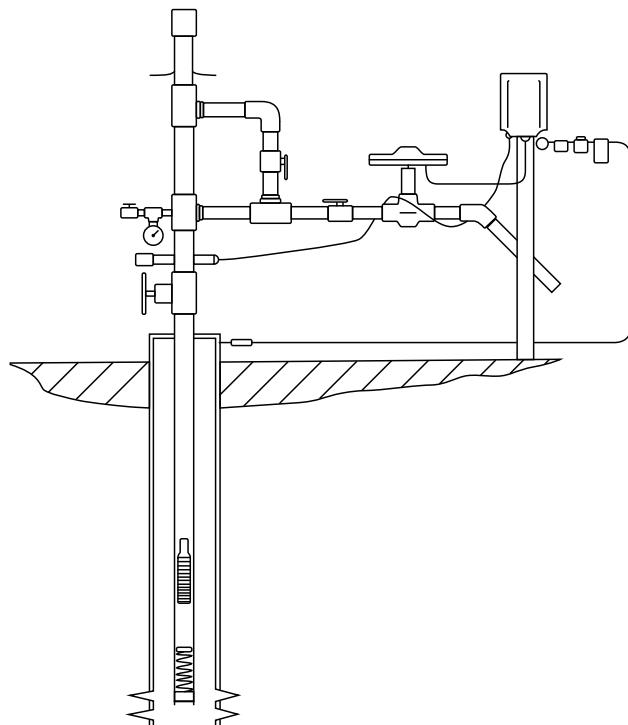


Figura 2.5: Tipica installazione di plunger (Lea et al. 2011).

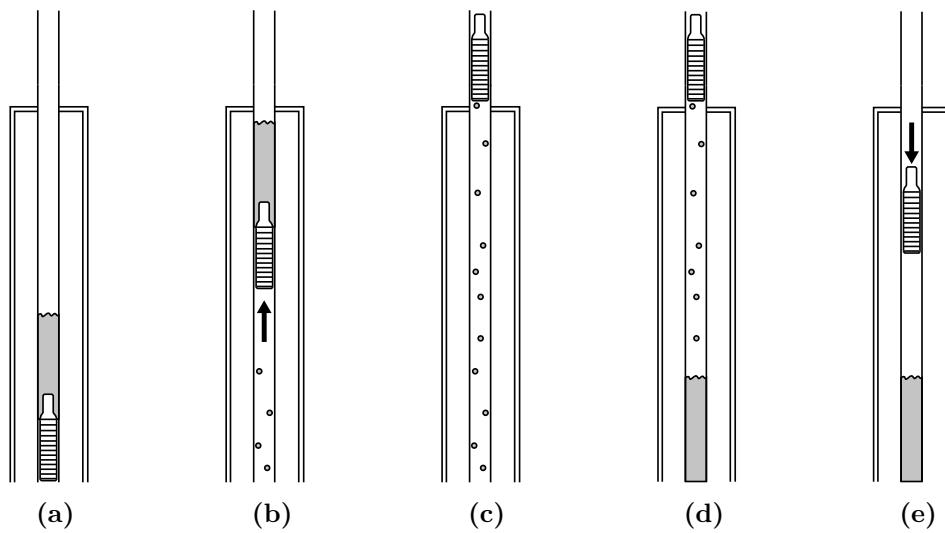


Figura 2.6: Ciclo di un plunger convenzionale.

In commercio esistono varie tipologie di plunger e variano a seconda della geometria e degli inserti installati sulla superficie esterna (e.g. spazzole per la pulizia del tubino di produzione). Negli ultimi anni sono nati nuovi sistemi definiti a ciclo libero o in continuo, che permettono la discesa senza interrompere la produzione. Numerosi sono i brevetti e i prodotti che offrono *plunger-lift* in continuo: possono essere dotati di una valvola interna (e.g. Weatherford RapidFloTM, FB FreeCycleTM o McClainTM) oppure a due pezzi (e.g. PeacemakerTM, composto da una sfera e un manicotto). La Figura 2.7 mostra alcune tipologie presenti sul mercato.

L'applicazione di plunger in pozzo per il sollevamento artificiale richiede un investimento iniziale relativamente basso, ma dei costi operativi che possono incidere col tempo e portare a un aumento imprevisto del costo di produzione del gas. Gli investimenti iniziali indiretti possono decidere la scelta dell'installazione del plunger: la variazione dei volumi di gas e liquido rende necessaria una nuova valutazione circa il dimensionamento degli impianti di trattamento a valle del pozzo, i costi iniziali possono essere quindi legati per esempio all'installazione di un nuovo separatore.

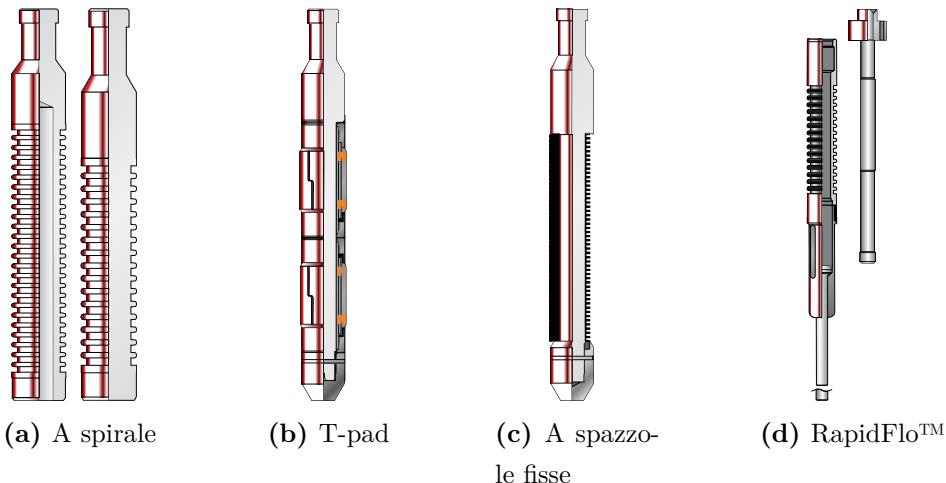


Figura 2.7: Principali tipologie di plunger proposte da Weatherford (Weatherford International Ltd. 2008).

2.2.4 Altri sistemi di sollevamento artificiale per deliquification

Alcune tecnologie per l'attenuazione del battente idrostatico in pozzo nascono da applicazioni pensate in origine per il sollevamento artificiale di giacimenti a olio. Questi sistemi sono stati riadattati per il trascinamento dell'acqua a fondo pozzo o per agevolare l'afflusso del gas in pozzo. I sistemi presentati nel paragrafo corrente sono tutti a energia esterna.

Gas lift

Il *gas lift* per *deliquification* consiste nell'iniezione di gas da una fonte esterna al pozzo a una certa profondità. Nel campo dell'olio il gas iniettato a fondo pozzo diminuisce il peso della colonna, facilitando così il flusso in condotta. Nel caso dei pozzi a gas viene fatto fluire gas a fondo pozzo sia per diminuire la densità della colonna idrostatica, sia per aumentare la produzione di gas effettiva, quindi l'efficacia di trascinamento della colonna da parte della corrente gassosa. Questo sistema gode il vantaggio di non provocare significative variazioni delle condizioni di produttività e riesce a lavorare anche in pozzi deviati. L'applicazione purtroppo dipende fortemente dalla presenza di una sorgente di gas ad alta pressione, rappresentata da un pozzo nella zona limitrofe o all'installazione di compressori per il rilancio di gas a fondo pozzo.

Sistemi di pompaggio

Le pompe a cavalletto (*Beam Pump*, BP), impiegate in modo massiccio per il sollevamento artificiale per giacimenti a olio, rappresentano il sistema di pompaggio più comune anche nel GWD. Generalmente i sistemi di pompaggio spingono la colonna idrostatica lungo il tubino di produzione (o un tubino ausiliario, come un *coiled tubing* installato a posteriori) e il gas prodotto viene fatto fluire nell'annulus. Altri sistemi di pompe utilizzate anche in questo campo sono le pompe elettriche sommerse (*Electrical Submersible*

Pump, ESP), pompe a cavità progressiva (*Progressing Cavity Pump*, PCP) e pompe idrauliche (a pistone o *jet pump*). Le pompe vengono generalmente impiegate quando la pressione a fondo pozzo è relativamente bassa e quando il rapporto gas/liquido non è sufficiente da garantire lo spiazzamento della colonna idrostatica tramite i sistemi a energia interna. Le pompe non possono operare in presenza di gas, perciò vanno opportunamente collocate al di sotto degli spari, in modo da ottenere una buona separazione del liquido dal gas. La vita media delle pompe dipende fortemente dagli agenti di erosione, è importante capire se la produzione di liquidi e gas comporta anche la produzione di sabbia.

2.3 Schiumogeni

L'impiego di schiumogeni nell'industria petrolifera è vario e ormai consolidato nel tempo. Come visibile in Tabella 2.1 i tensioattivi sono impiegati in tutte le fasi di recupero del greggio e nell'industria di processo, dalle perforazioni, iniezioni in giacimento, produzione, al trasporto in condotta *onshore* e *offshore*.

I tensioattivi sono utilizzati anche in pozzo per mitigare i fenomeni di *liquid loading* e la tecnica ha ormai acquisito notevole importanza nel GWD. I tensioattivi sono introdotti in pozzo in tre modi:

- **schiumogeni in stick:** barre solide di sapone introdotte lungo il tubino di produzione senza la necessità di interrompere la produzione;
- **schiumogeni liquidi in-batch:** viene chiuso il pozzo e viene immesso lungo il tubino di produzione un certo volume di surfactanti seguiti da una soluzione salina, per poi riaprire il pozzo dopo aver atteso la discesa del surfactante;
- **schiumogeni liquidi in continuo:** una *capillary string*, collegata a una pompa dosatrice, viene calata lungo il pozzo fino all'altezza degli

Tabella 2.1: Alcuni esempi di applicazioni di tensioattivi nell'industria petrolifera; e fasi G, W e O rappresentano rispettivamente il gas, l'acqua e l'olio (Schramm 2006).

Applicazione	Fasi
Fluidi di perforazione con schiume	G/W
Fluidi di stimolazione e fratturazione con schiume	G/W
Fluidi acidificanti con schiume	G/W
Recupero di olio freddo e pesante tramite schiume	G/O
Schiume di processo della flottazione dell'olio	G/O
Schiume antincendio	G/W
Emulsioni per olio pesante in condotta	O/W
Emulsioni per la stimolazione pozzo	O/W
Flottazione di miscele a olio e sabbie bituminose	O/W
Fluidi di perforazione emulsionati (fanghi a base olio)	W/O
Emulsione di catrame e bitumi	O/W
Emulsioni in situ per EOR (<i>Enhanced Oil Recovery</i>)	O/W
Emulsione di carburanti di trasporto (70% olio pesante)	O/W
Schiume per il controllo della mobilità del gas	G/W
Sospensioni per fluidi (fanghi) di perforazione	S/W
Sospensioni per fratturazione idraulica e stimolazione del pozzo	S/W
Impasti cementizi in pozzo	S/W
Solidi di produzione a testa pozzo nel recupero primario dell'olio pesante	S/W

spari, lo schiumogeno liquido viene iniettato durante la produzione di gas.

Gli *stick* sono facili da utilizzare, non comportano modifiche di impianto e rappresentano il metodo più economico. Tuttavia interessano solo la parte superiore della colonna liquida e rimuovono parzialmente l'acqua a fondo pozzo; inoltre, essendo solubili in acqua, non agiscono in modo appropriato in presenza di idrocarburi condensati sull'interfaccia gas-liquido (Bolding et al. 2007). Gli schiumogeni liquidi o anche detti *foamer*, pur avendo costi maggiori e richiedendo maggiori accorgimenti per il loro utilizzo, sono molto più performanti, hanno la capacità di interessare tutta la colonna idrostatica e non sono influenzati dalla presenza di idrocarburi condensati (gli schiumogeni in-batch sono spinti da un *chaser*, gli schiumogeni in continuo agiscono alla base del pozzo). Nel seguente paragrafo si farà riferimento ai soli *foamer* liquidi, descrivendo i principi e le procedure operative per il sollevamento artificiale tramite tensioattivi liquidi.

2.3.1 Tensioattivi

I tensioattivi, surfactanti o agenti attivi di superficie sono composti organici composti al massimo da un gruppo liofilo (testa) e un gruppo liofobico (coda), come visibile in Figura 2.8. Si parla di testa idrofila e coda idrofoba se il solvente nel quale deve essere utilizzato il tensioattivo è acqua o a base acqua. In termini chimico-fisici la struttura di un surfactante è costituita da un gruppo polare e da un gruppo apolare. La Figura 2.8 mostra un esempio di struttura chimica di un tensioattivo con in evidenza il gruppo polare e apolare.

I surfactanti sono classificati in base alla carica del gruppo polare (Figura 2.9):

- **anionici:** in genere sali costituiti da lunghe catene con atomi di carbonio che terminano con un gruppo carbossilato, sulfonato o fosfato;

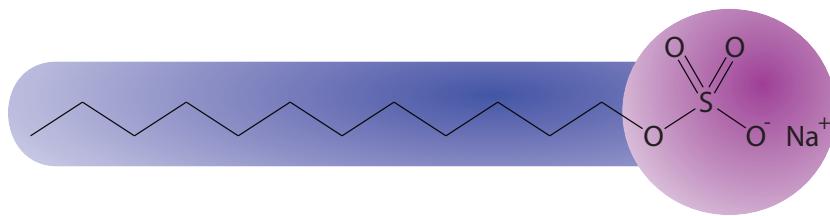


Figura 2.8: Laurilsolfato di sodio, tensioattivo anionico utilizzato in molte famiglie di prodotti domestici. La catena a 12 atomi di carbonio rappresenta il gruppo apolare (in blu) mentre il gruppo solfato associato allo ione sodio rappresenta il gruppo polare (in viola).

- **cationici:** sali di cui è importante la parte positiva, costituita da lunghe catene di atomi di carbonio terminanti con un gruppo ammonico;
- **non ionici:** alcoli a lunga catena, come i derivati poliossietilenici degli acidi grassi;
- **anfoteri o zwitterionici:** tensioattivi anionici in ambiente alcalino, tensiattivi cationici in ambiente acido.

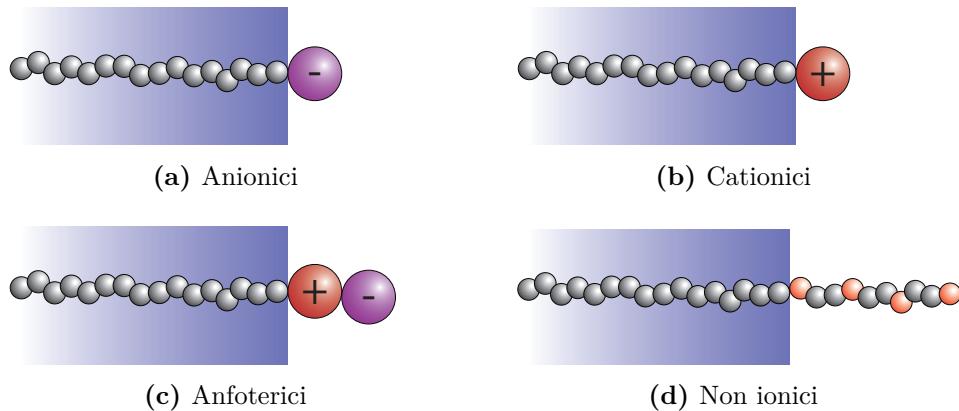


Figura 2.9: Classificazione dei tensioattivi in base alla carica del gruppo polare.

Si consideri un volume d'acqua a contatto con aria dove vengono disciolti dei tensioattivi. I surfactanti, in prossimità della superficie di contatto delle

due fasi, si orientano in modo tale che il gruppo polare sia adsorbito dalla fase liquida e il gruppo apolare permanga nella fase gassosa. Tale adsorbimento porta alla diminuzione dell'energia libera di Gibbs o entalpia libera, quindi alla riduzione della tensione superficiale tra le due fasi. Allo stesso modo i tensioattivi possono diminuire la tensione superficiale dell'acqua a contatto con una generica fase olio o di un solido, aumentando la bagnabilità di quest'ultimo.

Un altro modo per limitare il contatto del gruppo apolare con l'acqua è la creazione di strutture bi- o tridimensionali, capaci di racchiudere i gruppi apolari internamente e mettendo a contatto con l'acqua i gruppi polari (Figura 2.10). Queste strutture sono definite micelle, sono il frutto dei fenomeni di aggregazione dei tensioattivi e possono avere forma lamellare (in questo caso i surfactanti sono molecole anfifiliche o anfifobiche), sferica o cilindrica. Tali aggregati supramolecolari tendono a crearsi una volta superata una certa concentrazione del surfactante in soluzione, definita concentrazione micellare critica (CMC). La complessità di tali strutture dipende dalla concentrazione in acqua e dalla specie chimica dell'agente attivo di superficie.

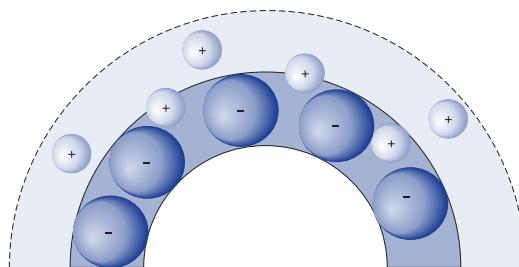
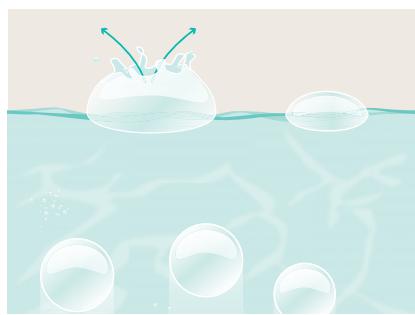


Figura 2.10: Sezione parziale di una micella anionica, il layer compatto negativo generato dall'orientamento del gruppo polare del tensioattivo è circondato dalla fase acqua (Attwood et al. 2012).

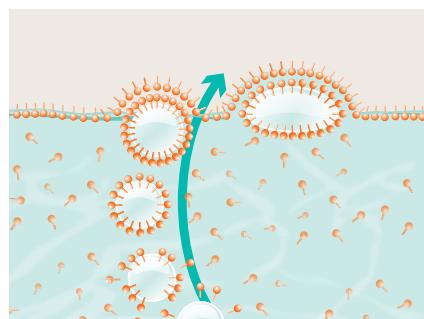
2.3.2 Schiuma

Viene definita schiuma una dispersione stabile di gas in un liquido. Se si introduce un flusso di aria all'interno di un liquido, le bolle così prodotte as-

sumono una forma sferica. Poiché l'aria ha densità minore dell'acqua queste tenderanno a salire in superficie. Se il liquido in questione è privo di surfactanti in soluzione, le bolle non sono stabili e si dissolvono spontaneamente (Figura 2.11a). Non è possibile quindi creare una schiuma stabile in un liquido senza la presenza di surfactanti. In liquidi con tensioattivi in soluzione, le bolle sono rese stabili grazie all'azione degli agenti attivi di superficie, che creano un film attorno alle bolle di gas. Una volta giunte in superficie, le bolle presentano un doppio strato o doppio film di tensioattivi sulla superficie (Figura 2.11b).



(a) Liquidi senza tensioattivi



(b) Liquidi con tensioattivi

Figura 2.11: Insufflazioni nel liquido e generazione delle bolle d'aria (Tego Chemie Service GmbH 2014).

Le bolle appena generate all'interno del liquidi, dalle piccole dimensioni e pressoché identiche, sono definite microbolle; le bolle visibili sulla superficie sono definite macrobolle. In un primo momento la schiuma generata è ricca in liquidi, le bolle hanno configurazione sferica e sono stabili grazie a spesse lamelle liquide a doppio strato di tensioattivo. Con il tempo la forza di gravità agisce sulla fase liquida della schiuma, che defluisce così verso il basso: il processo è definito drenaggio per gravità (Tego Chemie Service GmbH 2014). Si distinguono quindi due configurazioni di schiuma, prima e dopo il processo di drenaggio (Figura 2.12):

- **schiuma bagnata:** bolle sferiche e contributo importante della fase liquida;
- **schiuma asciutta:** struttura poliedrica dettata dalla bassa presenza di liquido e caratterizzata da lamelle di schiuma molto elastiche.

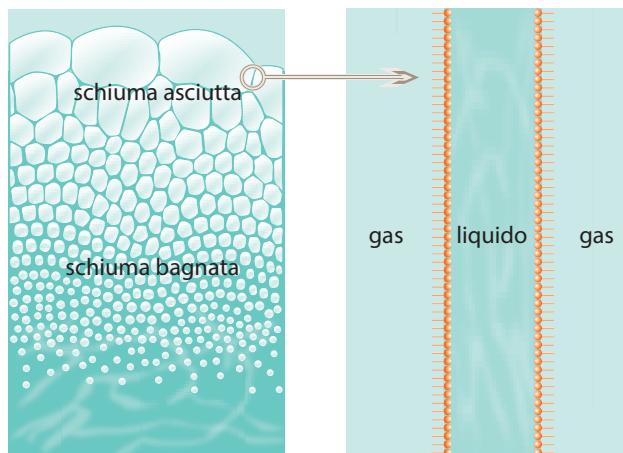


Figura 2.12: Struttura della schiuma e stabilizzazione della lamella a opera dei surfactanti (Tego Chemie Service GmbH 2014).

Il processo di drenaggio non è però sufficiente ad abbattere la schiuma. Si raggiunge un punto in cui il drenaggio non è più possibile poiché le alte concentrazioni di tensioattivi sono tali che le forze di repulsione elettrostatica e sterica impediscono un’ulteriore contrazione delle lamelle. La schiuma è quindi definita stabile quando si instaura uno stato di equilibrio tra il drenaggio per gravità e le forze di repulsione tra molecole.

Le sottili lamelle di schiuma, oltre ad essere stabili, sono molto elastiche. Un aumento della superficie delle lamella, provocato dalla deformazione della bolla, porta alla riduzione locale della concentrazione di surfactanti e di conseguenza a un aumento locale della tensione superficiale della lamella stessa. L’elasticità di Gibbs-Marangoni consente quindi alla schiuma, se sollecitata dall’esterno, di tornare alla configurazione geometrica iniziale.

2.3.3 Antischiuma

Gli antischiuma o *defoamer* sono agenti chimici capaci di penetrare la struttura lamellare della schiuma, destabilizzando la struttura della bolla per farla così esplodere. Le caratteristiche principali di un buon antischiuma sono:

- insolubilità nella soluzione generatrice di schiuma;
- bassa tensione superficiale;
- coefficiente di penetrazione (E) positivo;
- coefficiente di espansione (Σ) o coefficiente di *bridging* positivo oppure caratteristiche di *dewetting*.

L'insolubilità del *defoamer* non deve essere assoluta: l'antischiuma deve pur sempre essere sufficientemente compatibile con il mezzo da trattare. Come già detto il *defoamer* deve penetrare la lamella in modo da disgregare le bolle della schiuma. Un prerequisito fondamentale è quindi la capacità di penetrare il film di tensioattivi. La capacità penetrante dell'antischiuma è espressa fisicamente dal coefficiente di penetrazione E :

$$E = \sigma_{l/g} + \sigma_{l/d} + \sigma_{d/g}$$

dove σ rappresenta la tensione superficiale e fa riferimento alla fase liquido-gas (l/g), liquido-defoamer (l/d) e defoamer-gas (d/g). Solo se E è positivo, l'antischiuma è capace di permanere sulla parete della lamella, altrimenti rimane all'interno della soluzione liquida. Giunta sul film di surfactanti, la gocciolina di *defoamer* può espandersi su tutta la superficie della lamella, formando così delle lenti. Il risultato è una diminuzione della stabilità e flessibilità della lamella che porta così alla disgregazione della bolla. Il processo di espansione porta allo scorrimento del fluido nella lamella lungo le direzioni di espansione del *defoamer*. Il fenomeno è conosciuto come flusso di Marangoni e provoca un restringimento dello strato della lamella, destabilizzando

ulteriormente la struttura della bolla. Il coefficiente di espansione Σ esprime le capacità espandenti dell'antischiuma:

$$\Sigma = \sigma_{l/g} - \sigma_{l/d} - \sigma_{d/g}$$

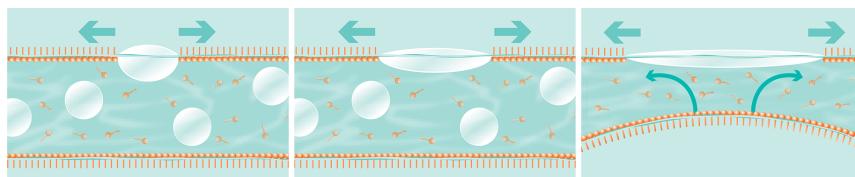


Figura 2.13: Penetrazione e espansione del *defoamer* sul film di tensioattivi (Tego Chemie Service GmbH 2014).

I *defoamer* con insufficienti capacità espandenti possono trattare la schiuma tramite il processo di *bridging*. Requisito fondamentale è la capacità dell'antischiuma di penetrare sia il film esterno della lamella, quindi un coefficiente di penetrazione positivo, sia il film interno.

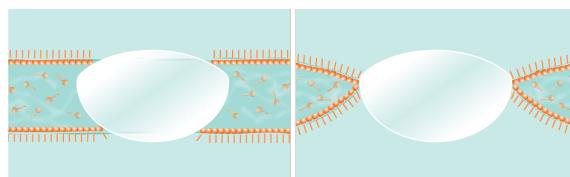


Figura 2.14: Processo di bridging del *defoamer* sul film di tensioattivi (Tego Chemie Service GmbH 2014).

Ciò è possibile se la lamella è sufficientemente ristretta grazie al drenaggio per gravità oppure se le bolle sono sufficientemente grandi per via del fenomeno di coalescenza. Raggiunta l'altra parete della lamella, la rottura della lamella può avvenire per allungamento o *dewetting*. I due meccanismi sono possibili se il coefficiente di *bridging* B è positivo:

$$B = (\sigma_{l/g})^2 + (\sigma_{l/d})^2 - (\sigma_{d/g})^2$$

Se l'antischiuma agisce tramite *dewetting*, la soluzione liquida non riesce a entrare totalmente in contatto con le goccioline di *defoamer*. Di conseguenza, il fenomeno di *dewetting* porta al collasso delle bolle generate dai

tensioattivi. Anche gli agenti solidi portano al fenomeno di *dewetting*. Se il processo di rimozione di schiuma avviene tramite l'allungamento delle lamelle, le goccioline di antischiuma agiscono sul punto più debole della lamella per portarla alla lacerazione e quindi alla destabilizzazione della configurazione totale della schiuma.

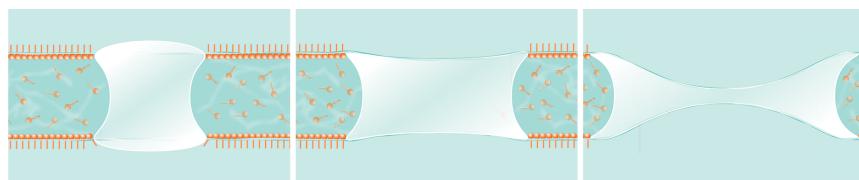


Figura 2.15: Processo di dewetting del *defoamer* sul film di tensioattivi (Tego Chemie Service GmbH 2014).

Attualmente le classi di *defoamer* in commercio sono:

- **siliconici:** i polisilossani e suoi affini (e.g. polidimetilsilossani) appartengono al gruppo di antischiuma più comunemente utilizzati, sono polimeri costruiti su un gruppo silossano, dove al centro della molecola si alternano atomi di silicio e ossigeno, hanno grandi capacità di espansione e efficacia a largo spettro;
- **oli minerali:** generalmente idrocarburi alifatici e non aromatici per motivi ambientali, queste molecole apolari hanno buone capacità di espansione, hanno problemi in ambienti molto alcalini e ad alte temperature;
- **a base di olio vegetale:** o anche definiti antischiuma VOC-free (*Volatile Organic Compounds*), presentano proprietà molto simili agli oli minerali con il vantaggio di utilizzare una risorsa rinnovabile, solitamente con l'aggiunta di siliconi e cere sintetiche;
- **a base di polimeri:** possono essere acidi grassi modificati, polieteri o ammine modificate, la polarità di queste molecole può essere cambiata lavorando la struttura chimica e, grazie alla loro grande compatibilità, sono impiegati laddove non è possibile impiegare altri *defoamer*.

2.4 Applicazioni di schiumogeni per il Gas Well Deliquification

L'applicazione di surfactanti o schiumogeni in pozzi caratterizzati da un battente idrostatico a fondo pozzo permette il trascinamento dei liquidi per valori di portata inferiori a quella critica e evita il riaccumulo di questi una volta spiazzato il pozzo. Si consideri la (2.1.1): Turner et al. (1969) fornisce il valore della velocità critica in funzione della densità dei fluidi e della tensione superficiale fra le due fasi. L'impiego di surfactanti permette di ridurre la tensione superficiale tra i liquidi e l'acqua, così come la densità dell'acqua, trasformata in parte in schiuma. Campbell et al. (2001) definisce in via teorica che la tensione superficiale possa essere ridotta da 60 dyne/cm a 30 dyne/cm e che la densità della schiuma possa attestarsi al 20% della densità originaria della fase liquida (Figura 2.16). Da questi valori si può facilmente calcolare che i tensioattivi permettono di ridurre la portata critica di un pozzo di circa il 30%. Wittfeld et al. (2015) conferma questi dati sperimentalmente e propone una riduzione del valore di portata critica del 33%, con picchi del 45% su breve periodo.

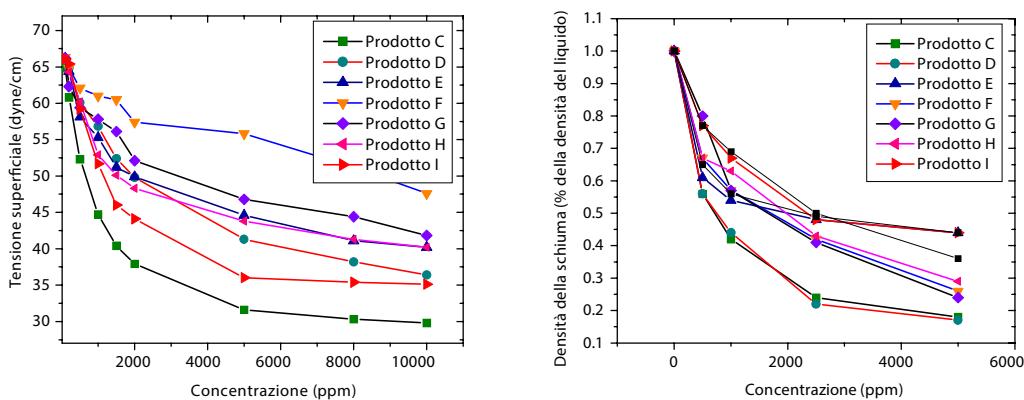


Figura 2.16: Tensione superficiale e densità della schiuma in funzione della concentrazione in acqua per tensioattivi attualmente disponibili sul mercato (Campbell et al. 2001).

2.4.1 Schiumogeni in-batch

L'applicazione di schiumogeni in-batch consiste nel pompaggio di un prefissato volume di tensioattivo (nell'ordine di centinaia di litri) all'interno del pozzo a intervalli prefissati. Un tipico ciclo in-batch di schiumogeno tramite sistema di pompaggio del tensioattivo (fisso o mobile) consiste in:

- chiusura del pozzo;
- apertura valvola di isolamento superiore e aggancio manicotto sul cappelletto flangiato della croce di produzione;
- pompaggio del *foamer*;
- pompaggio della soluzione salina (definito in questo caso *chaser*);
- chiusura della valvola di isolamento superiore;
- installazione sistema di iniezione antischiuma in linea di produzione
- riapertura pozzo il giorno seguente.

L'esperienza in campo suggerisce l'introduzione di *foamer* in pozzo in concentrazioni pari a 10000 ppm della colonna idrostatica che si desidera rimuovere. È difficile calcolare esattamente il volume di acqua in pozzo, è consuetudine quindi procedere con 50 litri di schiumogeno. Se l'applicazione ha successo, si tenta di diminuire il quantitativo al fine di non incorrere in fenomeni di emulsioni o inutile sovradosaggio del prodotto. Se si ipotizzano dei grossi volumi di acqua in pozzo, si consiglia un quantitativo di *foamer* attorno ai 100÷150 litri.

Il *chaser* è una soluzione salina con densità superiore di quella dell'acqua. La soluzione *chaser*-schiumogeno può così spingersi in modo appropriato lungo il pozzo e, grazie alla sua densità, può così raggiungere le parti più basse della colonna liquida. Inoltre il *chaser* evita l'evaporazione del *foamer* in profondità, con condizioni di temperatura e pressione maggiori. Ad oggi vengono utilizzate soluzioni a base di cloruro di potassio (densità relativa

$\rho_{r,KCl} = 1,05$), fino a qualche tempo fa erano preferite soluzioni a base di cloruro di sodio ($\rho_{r,NaCl} = 1,15$), di densità maggiore ma non più impiegate a causa della generazione spontanea di ponti salini in pozzo.

L'applicazione di *defoamer* è fondamentale per garantire la sicurezza e il corretto funzionamento dell'impianto di trattamento del gas, la quantità di defoamer da iniettare è legata alle caratteristiche qualitative e quantitative del *foamer* impiegato per lo spiazzamento dei liquidi.

I risultati ottenuti grazie all'impiego di schiumogeno non possono essere confermati dopo una sola prima applicazione, bensì devono essere svolti almeno 5 cicli in-batch prima di confermare l'efficacia del metodo per il pozzo in esame. Idealmente si possono verificare i benefici del *foamer* solo dopo settimane di applicazioni, i pozzi a produzione discreta programmata sono quindi i più idonei per l'applicazione in batch in pozzo. La Figura 2.17 mostra un pozzo con produzione intermittente regolare trattato con applicazioni di *foamer* in-batch.

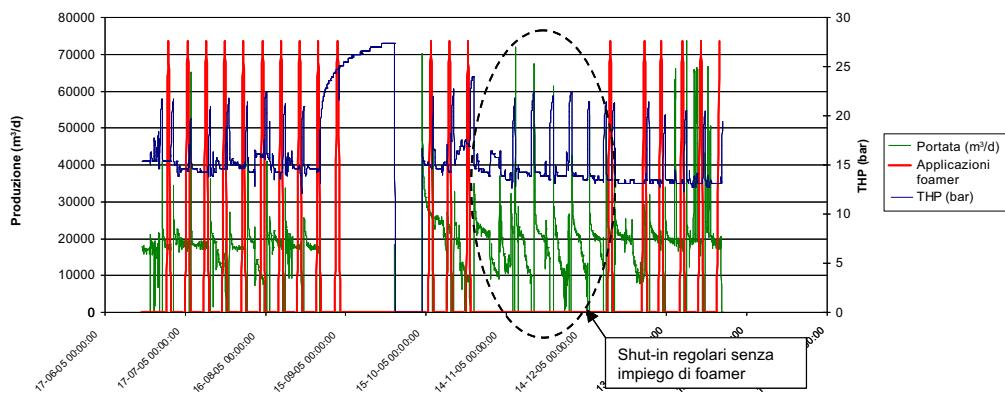


Figura 2.17: Applicazione di *foamer* in-batch su un pozzo con produzione a shut-in programmati (Wittfeld et al. 2015).

In rosso sono indicati i batch di schiuma applicati in pozzo. L'applicazione è stata poi fermata per 6-7 settimane per verificare l'efficacia dell'impiego di tensioattivi per il sollevamento artificiale dell'acqua. L'applicazione permette di avere produzioni molto più costanti, infatti i valori di portata tra uno

shut-in e l'altro sono pressoché identici. Wittfeld et al. (2015) ha confermato l'efficacia dell'applicazione trattando circa 60 pozzi. Trascurando i pozzi in cui non è stato possibile applicare il *foamer*, nel 50% dei casi si sono avuti degli evidenti miglioramenti di performance, il 30% non presenta elementi sufficienti per affermare o negare l'utilità del metodo, nel 20% la produzione di gas non risente affatto dell'applicazione.

L'impiego di schiumogeni in-batch richiede condizioni specifiche per garantire una buona riuscita dell'applicazione:

- **rappporto acqua-condensati (*Water to Condensate Ratio, WCR*):** gli idrocarburi condensati agiscono come antischiuma naturali e diminuiscono le performance dello schiumogeno;
- **tipi di condensato:** condensati di idrocarburi pesanti diminuiscono le performance della schiuma in maniera più decisa rispetto a condensati di idrocarburi leggeri;
- **impiego di altri prodotti chimici:** alcuni additivi chimici, come per esempio degli agenti anticorrosivi, sono conosciuti propriamente anche come *defoamer*;
- **solidi in sospensione o disciolti:** la formazione di schiuma risente della presenza di solidi nella soluzione liquida, sia sospesi (e.g. FeS) che disciolti (e.g. sali).

I costi di tale applicazione si aggirano a €xxx per batch e variano a seconda di quanti pozzi possono essere raggiunti in giornata: si tende quindi a trattare più pozzi nella stessa giornata al fine di spalmare i costi fissi della manodopera e della strumentazione in affitto.

2.4.2 Schiumogeni in continuo

L'applicazione di schiumogeno in continuo avviene tramite l'installazione di una *capillary string* attraverso la croce di produzione, all'interno del tubino

di produzione per scendere fino all'altezza desiderata di iniezione del *foamer*. La *capillary string* può essere installata anche in presenza di una valvola di sicurezza di fondo (*Surface Controlled Subsurface Safety Valve*, SCSSV), previa modifica di quest'ultima.

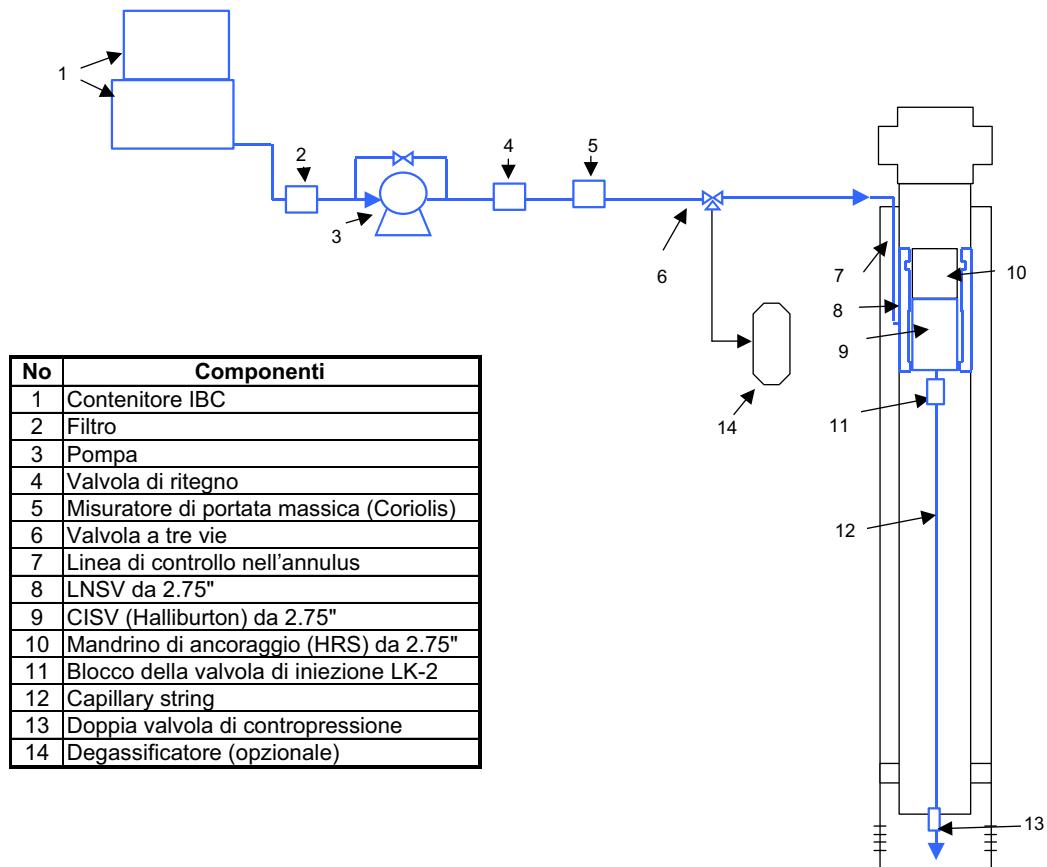


Figura 2.18: Schema generale di sistema di iniezione *foamer* in continuo tramite *capillary string* (Wittfeld et al. 2015).

I nuovi dispositivi di controllo idraulico in superficie devono rimanere indipendenti rispetto a quelli già esistenti sul campo, visto che il loro funzionamento avviene rispettivamente tramite tensioattivi liquidi e olio idraulico. Ciò comporta anche alla sostituzione di parte del sistema già esistente. La scelta obbligata della sostituzione è dettata dal fatto che lo schiumogeno non

deve mai entrare in contatto con l'olio idraulico per questioni di sicurezza, soprattutto durante fasi delicate come l'attivazione del sistema di chiusura d'emergenza (o *Emergency ShutDown*, ESD). La strumentazione superficiale di controllo iniezione, mostrata in Figura 2.18, prevede:

- (1) **contenitore IBC (*Intermediate Bulk Container*)**: tipicamente il *foamer* è distribuito e conservato in *bulk* costituiti da una gabbia tubolare in acciaio zincato assicurata ad un pallet dalla capacità di 1000 litri. Sul campo al contenitore IBC viene associato un contenitore più piccolo a monte, in modo da garantire la continuità dello schiumogeno in caso di sostituzione del *bulk* principale. Si preferisce utilizzare pallet trasparenti così da garantire all'operatore il controllo visivo del livello di *foamer*;
- (2) **filtro**: filtro meccanico con maglie da 20 µm a protezione dei dispositivi a valle da eventuali impurità;
- (3) **pompa**: solitamente a pistone, le pompe di iniezione lavorano a una pressione massima di 400 bar, rapporto tra potenza massima e potenza minima (rapporto di *turndown*) di 10:1 e capacità massima di circa 100 litri al giorno;
- (4) **valvola di rilascio in pressione (*Pressure Safety Valve, PSV*)**: configurata sulla base dell'equipaggiamento sotterraneo, solitamente a 300 bar circa;
- (5) **sistemi di misura**: un misuratore di portata massica associato a un misuratore di pressione per il monitoraggio continuo del sistema;
- (6) **valvola a tre vie**: collocata a valle della pompa, è fondamentale per l'intero sistema ESD, in caso di chiusura della SCSSV la valvola a tre vie devia il flusso a un contenitore libero o a un separatore.

La strumentazione in sotterraneo, sempre visibile in Figura 2.18 comprende:

- (7-10) **SCSSV modificata:** come già detto la *capillary string* può lavorare anche in presenza della valvola di sicurezza di fondo, la quale richiede però una modifica affinché questo sia possibile. Il *foamer* passa dalla linea di controllo idraulico (*control line*) e dentro il foro sigillato del raccordo di alloggiamento (*landing nipple*). Da qui lo schiumogeno può pressurizzare il *flapper* (o la sfera) della SCSSV in modo da aprirlo, oppure può scorrere lungo la parete esterna della valvola grazie alla *capillary string*, per poi essere iniettato tramite la valvola LK-2;
- (11) **valvola di iniezione LK-2:** regola l'iniezione del *foamer* e si trova direttamente al di sotto della valvola di fondo. Una configurazione ideale prevede una pressione di apertura della SCSSV a 70 bar e una pressione di apertura della LK-2 a 150 bar, in modo da consentire di mantenere aperta la valvola di fondo senza iniezione di schiumogeno.
- (12) **capillary string:** solitamente è impiegata una *capillary string* da $\frac{1}{4}$ " OD (*Outside Diameter*, diametro esterno) con uno spessore della parete di 0,035". Il materiale è solitamente Incoloy 625, una lega a base di nickel eccellente in ambienti corrosivi e dalle alte temperature. La capillary string può essere applicata fino a una profondità di 4.000 m, dopo la quale l'intero sistema può collassare sotto l'azione del peso proprio.
- (13) **doppia valvola di contropressione:** doppia barriera a sicurezza del pozzo durante l'installazione del sistema, tipicamente configurata per tenere la testa idrostatica della *capillary string*, dove però la regolazione è sempre a opera della LK-2.

Il controllo della schiuma avviene a opera di sistemi indipendenti di pompaggio antischiuma, simile a quello impiegato per il *foamer* ma che differisce per alcuni aspetti:

- assenza della valvola a tre vie;

- nessuna valvola di controllo di alta e bassa pressione (*Pressure Control Valve*, PCV);
- capacità di iniezione massima di 15 l/h.

Wittfeld et al. (2015) ha testato gli schiumogeni in continuo su 7 pozzi, 4 dei quali hanno risposto ottimamente all'applicazione. La Figura 2.19 mostra l'andamento di un pozzo trattato con successo tramite iniezione in continuo di *foamer*. Il pozzo era caratterizzato da produzione incostante e veniva aperto

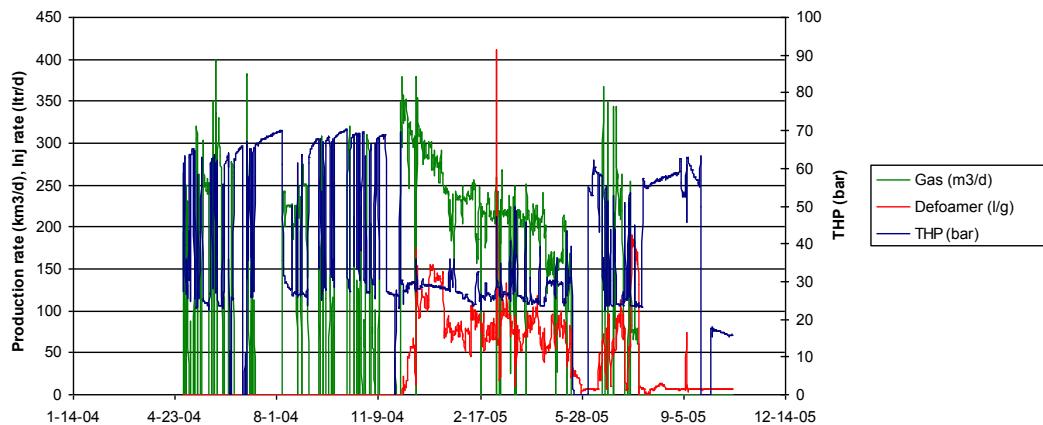


Figura 2.19: Valutazione pre- e post-applicazione di *foamer* in continuo su un pozzo affetto da *liquid loading* (Wittfeld et al. 2015).

solo per brevi periodi. Una volta iniziata l'applicazione di schiumogeno in continuo, la produzione di gas si è notevolmente stabilizzata, con portate medie quasi raddoppiate. Il pozzo ha mantenuto questo andamento e ha garantito produzione di gas per 9 mesi.

Alcune sono le condizioni affinché l'applicazione abbia esiti positivi:

- **risposta positiva al *foamer* in-batch:** se un pozzo risponde bene alle applicazioni in-batch, esso può considerarsi un ottimo candidato all'applicazione di schiumogeno in continuo. Questa condizione risulta essere importante ma non necessaria: se un pozzo non reagisce in maniera positiva ai batch di schiuma, non vuol dire in modo assoluto che non sia un candidato idoneo per l'iniezione tramite *capillary string*;

- **riduzione sufficiente della portata critica:** una volta applicato il *foamer* in continuo, il pozzo deve comunque avere sufficiente energia per spiazzare l'acqua e evitare nuovamente l'aumento del battente idrostatico a fondo pozzo. Come già detto all'inizio del paragrafo 2.4 l'applicazione di *foamer* porta a riduzioni della portata critica fino al 33%, ciò vuol dire che il pozzo deve avere energia sufficiente a garantire il 66% della portata critica standard;
- **ottimizzazione del IPR:** è utile stimare le variazioni di IPR dopo l'applicazione del schiumogeno in modo da verificare l'entità della variazione dello stesso parametro. Se la variazione risulta eccessiva, l'installazione della *capillary string* non è particolarmente consigliata;
- **accesso al pozzo:** è necessario che il pozzo non presenti ostacoli o particolari restringimenti per l'installazione della *capillary string* fino alla profondità desiderata;
- **disponibilità a test temporanei:** in alcuni casi, è opportuno condurre un test di 4-5 giorni per verificare l'efficacia del test, il pozzo deve essere quindi predisposto all'installazione anche solo temporanea del sistema di iniezione.

I costi legati all'impiego di un sistema di iniezione in continuo sono legati agli investimenti iniziali e ai costi in vita. L'investimento iniziale prevede le modifiche della strumentazione di superficie (€xxx), l'acquisto della *capillary string* (€x per metro), la modifica all'SCSSV (€xxx) e l'installazione della strumentazione in sotterraneo (personale di terra già presente), per una spesa totale di €xxxx. I costi in corso di utilizzo sono legati all'impiego di *foamer* e *defoamer* (€x per litro, quindi €xxxx all'anno) e i costi di manutenzione e riparazione (€xxx), per un totale di €xxxx di spese medie annuali.

Non solo gli impianti di produzione, ma anche gli impianti di trattamento del gas risentono notevolmente dei miglioramenti di performance del pozzo: senza dimenticare che l'aumento di portata garantisce maggiori introiti

giornalieri, una produzione più regolare consente di trattare il gas in modo più idoneo e sicuro. Per conoscere i vantaggi anche a livello impiantistico, nel prossimo capitolo viene fornito un *excursus* sui trattamenti necessari alla trasportabilità e alla distribuzione del gas naturale

Capitolo 3

Impianti di trattamento del gas naturale

Il gas naturale in uscita dai pozzi di produzione è caratterizzato dalla presenza di idrocarburi e altre sostanze associate. Queste sostanze influenzano negativamente il potere calorifico superiore (*PCS*) e possono creare problemi in fase di trasporto in condotta come la formazione di idrati. Per ovviare a questi problemi il gas naturale deve essere sottoposto a una serie di trattamenti con l'obiettivo finale di avere un prodotto facilmente trasportabile in condotta e che garantisca dei valori di *PCS* in linea con le richieste delle società di distribuzione. La formazione di idrati è influenzata dalla presenza di acqua associata al gas naturale, per ovviare al problema si rendono necessari interventi di disidratazione spinta della corrente gassosa. Altri trattamenti sono legati al recupero degli idrocarburi condensati, sostanze acide o elementi inerti. Nel seguente capitolo si espongono le specifiche tecniche del gas, i processi di trattamento e le relative apparecchiature e impianti.

3.1 Specifiche del gas di vendita

Il gas naturale è una miscela di idrocarburi allo stato gassoso costituita in gran parte da metano e da idrocarburi più pesanti. Altre componenti spesso

presenti sono acqua, anidride carbonica, azoto, idrogeno solforato e sulfati, in alcuni casi anche elio e metalli pesanti come mercurio. In Tabella 3.1 è riportato un esempio di composizione centesimale di un gas naturale.

Tabella 3.1: Composizione centesimale di un gas naturale tramite cromatografia del gas (Mele 2012).

Componenti	% in volume
Azoto	0,17
Anidride carbonica	0,02
Metano	99,71
Idrogeno solforato	-
Etano	0,06
Propano	0,03
Iso-butano	0,01
Neopentano	tracce
Iso-pentano	-
Esani	-
Ottani	-
Eptani	-

Ai fini della distribuzione e vendita, il gas naturale deve rispettare parametri specifici per poter poi essere immesso nelle reti nazionali. La rete di distribuzione non prevedono alcun trattamento del gas, ma delle semplici compressioni e decompressioni a seconda delle esigenze dell'utente finale. Il gas deve essere quindi opportunamente trattato nel rispetto di tali specifiche prima dell'immissione in rete.

Potere calorifico e indice di Wobbe

Il gas naturale viene utilizzato maggiormente come combustibile e deve fornire un potere calorifico a specifica su tutto il territorio nazionale. Come parametro di riferimento si assume il potere calorifico superiore (*PCS*) standard pari a quello del metano pari a 9.100 kcal/Smc o 38,1 MJ/Smc, con

un campo di variabilità nell'ordine del $\pm 10\%$. È importante ricordare che il *PCS* di un gas naturale può raggiungere questi valori anche in presenza di gas inerti come anidride carbonica e azoto, essendo formato da idrocarburi superiori che innalzano notevolmente il potere calorifico medio.

A questo proposito è utile introdurre l'indice di Wobbe I_W definito come:

$$I_w = \frac{PCS}{\sqrt{\rho_s}}$$

dove ρ_s è la densità specifica del gas (densità relativa rispetto a quella dell'aria). L'indice di Wobbe di riferimento è pari a 11,6 kcal/Smc o 48,5 kJ/Smc, con una variabilità consentita del $\pm 5\%$. Nella valutazione della compatibilità di un gas per la sua immissione nella rete di distribuzione, è più corretto far riferimento all'indice di Wobbe: il campo di variazione più ristretto equivale a una minore presenza di gas inerti in miscela.

Punto di rugiada dell'acqua e degli idrocarburi

Il gas non deve presentare condizioni di condensazione di acqua e/o idrocarburi in alcuna fase di trasporto e distribuzione. Le specifiche di immissione di pressione e temperatura variano a seconda dello specifico punto di consegna in funzione delle diverse condizioni geografiche e climatiche, con queste anche i punti di rugiada (*dew point*) in acqua e in idrocarburi. Questi valori sono calcolabili tramite la rappresentazione del diagramma di fase relativo. Si considerano due specifiche diverse (in acqua e in idrocarburi) per i motivi seguenti:

- **formazione di idrati:** si deve tenere maggiormente in considerazione la condensazione d'acqua rispetto a quella di idrocarburi a causa della formazione di idrati in condotta (trattati più avanti nel paragrafo 3.3);
- **andamento non univoco della saturazione rispetto alla pressione:** essendo il gas naturale una miscela multicomponente, nel definire la specifica di *dew point* in idrocarburi non si fa riferimento, come in acqua, a una pressione prefissata, ma a tutto il campo i pressioni a

partire da quella atmosferica. Il diagramma di fase di una miscela multifase, visibile in Figura 3.1, è caratterizzato dalla zona di condensazione retrograda: in questa condizione con una riduzione di pressione (a temperatura costante) gli idrocarburi condensano anziché evaporare.

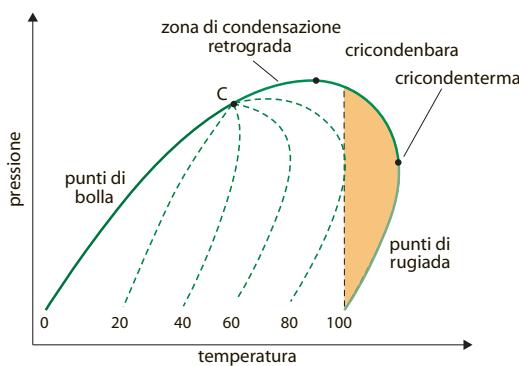
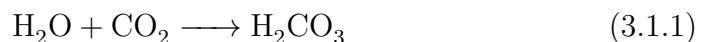


Figura 3.1: Diagramma di fase per una miscela multicomponente (Bianco 2005a)

Gas inerti (CO_2 e N_2)

L'anidride carbonica (CO_2) in giacimento nasce dall'iterazione delle acque di strato con i silicati e i carbonati presenti. L'acido carbonico, composto che si forma per idratazione dell'anidride carbonica, rappresenta un problema concreto per gli impianti di trasporto del gas naturale.



Oltre al problema degli acidi, la CO_2 contribuisce all'incremento dei gas inerti totali (l'azoto N_2 e appunto l'anidride carbonica). Si preferisce comunque rimuovere il CO_2 (fino al raggiungimento dell'indice di Wobbe) rispetto all'azoto per la sua facilità tecnica di abbattimento. In generale si parla di volumi accettabili di CO_2 attorno al 3% con un contenuto totale di gas inerti che non deve mai superare il 6,5%.

Acido solfidrico (H_2S)

L'acido solfidrico o idrogeno solforato (H_2S) è un gas incolore dall'odore caratteristico di uova in decomposizione. L' H_2S rappresenta uno dei sottoprodoti della decomposizione di proteine contenenti zolfo e dalla riduzione diretta di solfati (SO_4^{2-}) da parte di batteri, funghi e attinomiceti presenti in giacimento, ambiente anossico. L' H_2S è la principale causa di corrosione nella produzione di gas naturale, è altamente tossico e, a certe concentrazioni, anche mortale. Il contenuto massimo accettato è molto basso: Snam Rete Gas richiede un contenuto massimo di 6,6 mg/Smc.

Zolfo totale

L'abbattimento dello zolfo totale nel gas naturale è legato più a questioni ambientali che a questioni di sicurezza. Il contenuto di zolfo totale massimo richiesto da Snam Rete Gas è di 150 mg/Smc, con un valore massimo di zolfo da mercaptani 15,5 mg/Smc. La rimozione dei mercaptani avviene tramite impianti che differiscono da quelli utilizzati per la rimozione di acido solfidrico e altri acidi.

Solidi sospesi

I solidi sospesi vengono normalmente abbattuti durante i processi di separazione dei liquidi dal gas. Nel trattamento del gas naturale è sempre presente un sistema di filtraggio dei solidi sospesi prima del conteggio fiscale.

3.2 Separazione gas-liquido

La dinamica delle particelle disperse in un fluido studia i fenomeni di sedimentazione di gocce di liquido in un gas applicando gli stessi principi della separazione per gravità liquido-liquido. Il calcolo della velocità terminale w_t viene effettuato in base al bilancio statico delle forze che agiscono sulla singola particella, condizione nella quale la velocità è costante. Nel caso di

Tabella 3.2: Parametri di controllo della qualità richiesti dalla Snam Rete Gas (Snam Rete Gas 2015).

Parametri	Valori consentiti	Unità di misura
Potere Calorifico Superiore	34,95 ÷ 45,28	MJ/Smc
Indice di Wobbe	47,31 ÷ 52,33	MJ/Smc
Densità relativa	0,5548 ÷ 0,8	
Ossigeno	≤ 0,6	% mol
Punto di Rugiada dell'acqua (p=7 MPa)	≤ -5	°C
Punto di Rugiada degli idrocarburi (p=0,1 ÷ 7 MPa)	≤ 0	°C
Temperatura max	< 50	°C
Solfuro di idrogeno	≤ 6,6	mg/Smc
Zolfo da mercaptani	≤ 15,5	mg/Smc
Zolfo Totale	≤ 150	mg/Smc

particelle sferiche indeformabili di raggio D_p , la velocità terminale w_t si può ricavare da:

$$w_t = \sqrt{\frac{4 g D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 C_d \rho_l}} \quad (3.2.1)$$

dove g è l'accelerazione di gravità, ρ_p e ρ_f sono la densità rispettivamente della particella e del fluido disperdente, C_d è definito coefficiente di galleggiamento o *drag coefficient*. Nel caso di separazione per gravità liquido-liquido e condizioni di moto laminare, quindi per bassi valori del numero di Reynolds Re , la (3.2.1) assume la forma della legge di Stoke:

$$w_t = \frac{(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} D_p^2 g \quad (3.2.2)$$

Per quanto riguarda particelle fluide immerse in un gas la condizione di moto laminare non è rispettata, a causa dei bassi valori della viscosità del gas quindi dell'alto valore del numero di Reynolds. In questo caso il calcolo del coefficiente di galleggiamento è effettuato tramite modelli sperimentali e calcolo per tentativi (*trial and error*). La separazione per gravità è un

processo grossolano che permette l'abbattimento di particelle nell'ordine di $250 \mu\text{m}$ o di poco inferiore. Gli abbattitori (anche *knockout* o KOD, *Knock-Down Drum*) sono particolari separatori che agiscono per semplice gravità, utili per eliminare o solo l'acqua liquida o tutto il fluido trascinato dal gas. Sono generalmente collocati a monte di impianti di separazione meccanica a bassa temperatura (par. 3.3.2) o a protezione di una fiaccola. Il dimensionamento dei KOD è basato sul bilancio tra tempo di ritenzione e tempo di decantazione delle particelle liquide in flusso gassoso. Nei casi in cui si vogliono ottenere delle migliori performance di abbattimento dei liquidi si deve ricorrere a unità snebbianti che facilitino la coalescenza delle gocce e favoriscano l'abbattimento di gocce con diametro superiore ai $10 \mu\text{m}$. Una delle unità snebbianti più comunemente utilizzate è il pacco rete (*wire mesh pad*), inserito perpendicolarmente al flusso del gas. L'equazione che determina la velocità massima nella materassina snebbiante (*mist eliminator*) è:

$$w_t = K \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}} \quad (3.2.3)$$

dove costante K varia in base al separatore e alla pressione operativa.

Nel campo della separazione di liquidi dal gas sono molto utilizzati anche i cicloni e i pacchi vani. I cicloni sono unità di coalescenza che sfruttano l'effetto centrifugo ottenuto tramite il movimento circolare del gas, con abbattimento delle particelle liquide fino ai $3 \mu\text{m}$. I pacchi di vani sono elementi coalescenti molto utilizzati anche nel trattamento dell'olio e sfruttano l'"effetto chicane" che si instaura nel flusso. Queste due unità di coalescenza sono preferite per il trattamento di gas caratterizzato da un notevole contenuto di solidi, come cristalli di paraffina separatisi dalla fase liquido in condizioni di bassa temperatura.

3.3 Disidratazione e degasolinaggio

La variazione delle condizioni operative può dar luogo a fenomeni di condensazione di idrocarburi e/o acqua a partire da una miscela di idrocarburi allo

stato gassoso. Quando in una corrente di gas naturale si ha la formazione di acqua libera, per determinate condizioni di flusso possono formarsi dei composti solidi detti idrati. Il termine "idrato" è un termine generico per intendere nello specifico composti di inclusione o clatrati (dal latino *clathratus*, ingabbiato), strutture molecolari in cui un tipo di molecole avvolge un altro tipo di molecole. Le prime sono dette molecole ospitanti mentre le altre molecole ospiti. Per gli idrati di gas naturale le molecole ospitanti sono le molecole di acqua, mentre le molecole ospiti sono le molecole costituenti il gas naturale. La particolare conformazione è stabile in fase solida, dove le molecole ospitanti formano un reticolo cristallino al cui interno si generano delle cavità in cui si posizionano le molecole di gas. A differenza del ghiaccio, la formazione degli idrati è fortemente dipendente dalle condizioni di pressione: maggiore è la pressione parziale del gas (quindi la concentrazione di molecole ospiti), maggiore è la temperatura di formazione degli idrati. La tendenza a formare idrati negli idrocarburi leggeri aumenta con il peso molecolare dell'idrocarburo e la presenza di anidride carbonica (CO_2) e solfuro di idrogeno (H_2S). In generale, affinché gli idrati si possano formare è necessario che si instaurino le seguenti condizioni:

- presenza acqua allo stato liquido;
- presenza di idrocarburi;
- moto turbolento;
- relativamente alta pressione e bassa temperatura.

Sono stati sviluppati dei diagrammi che consentono di prevedere la formazione di idrati a determinate condizioni di pressione e temperatura, in funzione alla densità o peso molecolare medio del gas Figura 3.2. Gli idrati possono formarsi all'interno delle singole condotte o concentrate su un collettore e possono danneggiare l'impianto in numerosi modi. L'occlusione parziale o totale della condotta porta a un aumento della pressione a monte del tappo di idrati con conseguente rottura della linea o per squarciamiento della

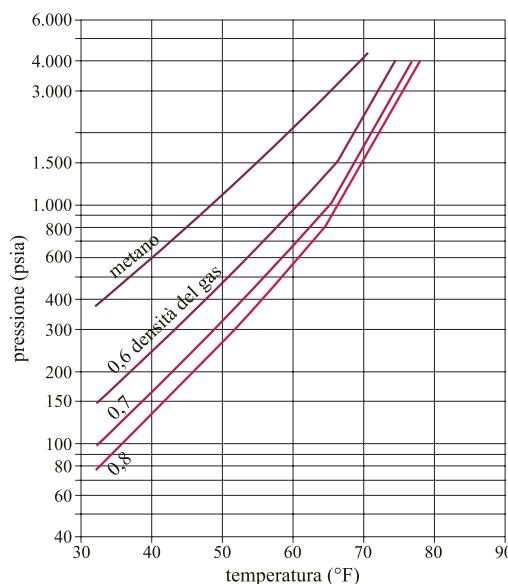


Figura 3.2: Diagramma della formazione degli idrati in funzione di temperatura e pressione (Bianco 2005a).

stessa o per impatto in corrispondenza di una curva (Figura 3.3a). Il tappo di idrati soggetto a riscaldamento localizzato può espandersi in modo incontrollato, portando all'inevitabile rottura della condotta (Figura 3.3b). Con l'interruzione di produzione a opera di una valvola, se la velocità del tappo è sufficientemente elevata, può intensificare gli effetti del colpo d'ariete (Figura 3.3c).

Si inibisce la formazione di idrati in via temporanea aumentando la temperatura di trasporto del gas o tramite l'impiego di inibitori chimici, mentre in via del tutto definitiva con la completa disidratazione chimica.

3.3.1 Inibizione chimica

Gli inibitori vengono utilizzati per brevi tratti di linea, come i collegamenti tra le aree pozzi e le centrali di trattamento del gas naturale. Gli inibitori di idrati sono composti ad alta igroscopicità e possono agire in fase sia gassosa che liquida come l'alcol metilico ($\text{CH}_3\text{—OH}$), sia in fase solo liquida come

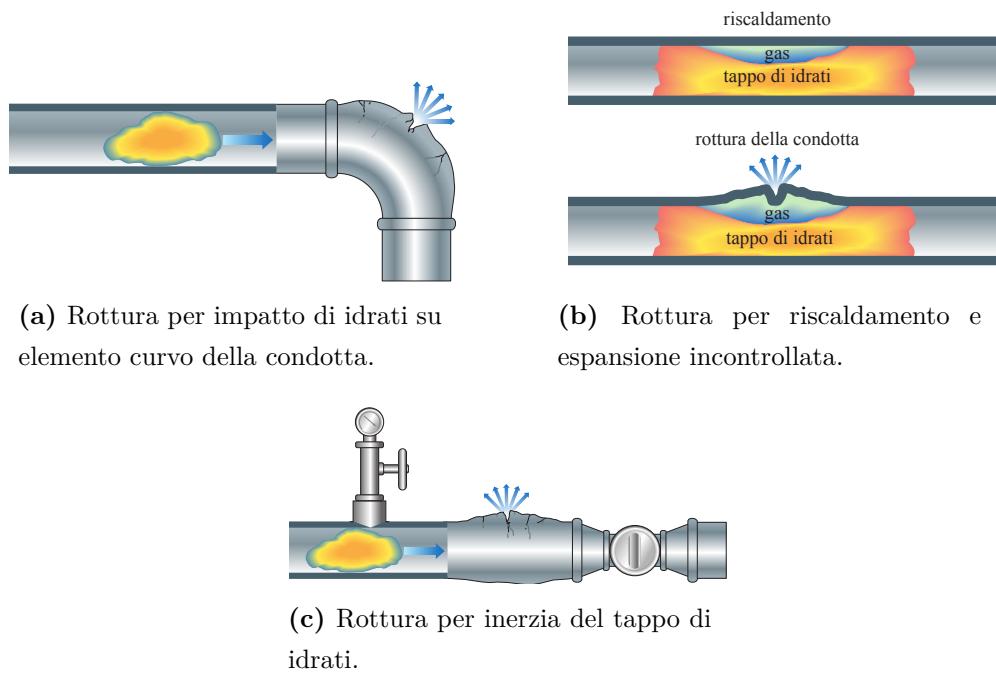


Figura 3.3: Danni in condotta creati dalla formazione di idrati (Borghi 2005).

il glicol monoetilenico o EG($C_2H_6O_2$) e dietilenico o DEG ($C_4H_{10}O_3$). Il glicol è preferito all'alcol metilenico per la minore volatilità e infiammabilità. Gli inibitori agiscono sul flusso gassoso in modo da abbassare il punto di congelamento spostando la formazione degli idrati verso valori più bassi di temperatura. La quantità o la concentrazione di glicol da iniettare è legata alle condizioni operative con cui si intende trasportare il gas naturale. La Figura 3.4 mostra l'abbassamento della temperatura relativa alla curva di formazione degli idrati in funzione della concentrazione di EG disciolto in acqua.

La rigenerazione del glicol, diluito in acqua all'arrivo della condotta, avviene tramite ebollizione dell'acqua in condensa, solitamente alla temperatura di 130°C.

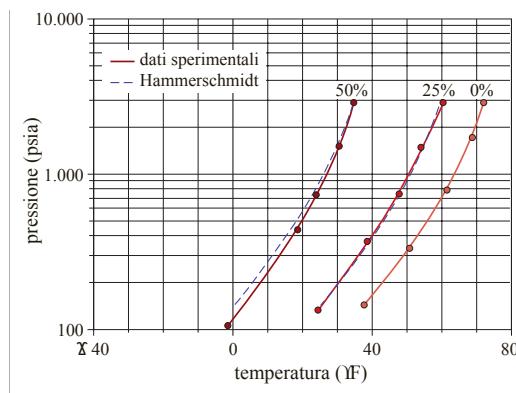


Figura 3.4: Inibizione degli idrati tramite glicol etilenico (Bianco 2005a).

3.3.2 Disidratazione per raffreddamento

Uno dei sistemi più semplici per la disidratazione di un gas consiste nel raffreddamento del gas stesso. La temperatura finale del trattamento deve coincidere con il punto di rugiada che si vuole ottenere. La disidratazione per raffreddamento, condizionamento a freddo o separazione a bassa temperatura (*Low-Temperature Separation, LTS*) si ottiene sfruttando l'effetto Joule-Thomson: grazie alla semplice espansione, la corrente gassosa riesce a diminuire la propria temperatura senza l'ausilio di energia esterna. L'intero processo viene ottimizzato tramite uno scambio termico carica-effluente a opera di uno scambiatore gas-gas, tale da sfruttare le temperature raggiunte nel processo come punti di pre- e post-trattamento del gas naturale. Gli impianti LTS richiedono pozzi a gas ad alta pressione che garantiscono un sufficiente salto entalpico sulla valvola di laminazione. Le basse temperature permettono di ottenere un sensibile abbassamento del punto di rugiada del gas e un maggiore recupero di condensato rispetto ai separatori tradizionali. Gli impianti di separazione a bassa temperatura (Figura 3.5) si basano su due elementi di processo fondamentali:

- separatore a bassa temperatura;
- scambiatore di calore.

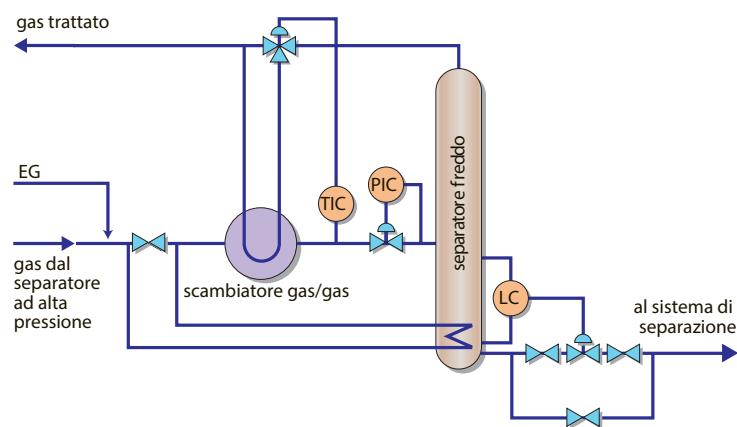


Figura 3.5: Condizionamento del gas tramite separatore a bassa temperatura (Bianco 2005a).

Il separatore a bassa temperatura, anche detto separatore a freddo o a espansione, rappresenta il fulcro dell'impianto. Il gas viene immesso nella parte superiore del separatore tramite una duse. L'espansione del gas provocato dalla duse porta a una diminuzione repentina della temperatura del flusso con la condensazione di acqua. L'acqua, precipitando verso il basso, forma degli idrati che si raccolgono anche essi nella sezione inferiore per gravità. I liquidi e gli idrati vengono raccolti e scaldati tramite il gas in arrivo dal pozzo tramite una serpentina immersa. Questo riscaldamento viene effettuato per abbattere gli idrati e far rievaporare nuovamente i componenti leggeri come metano e etano. Il rendimento del processo dipende fortemente dalla temperatura finale raggiunta, perciò si consiglia di isolare i separatori a bassa temperatura per aumentare le performance di separazione per condensazione. Lo scambiatore di calore gas-gas svolge una duplice funzione: provvede al preraffreddamento del gas in ingresso all'impianto di condensazione e al riscaldamento del gas in uscita riducendo al minimo la formazione di idrati.

L'unità di separazione a freddo può essere dotata di iniezione di inibitori al fine di abbassare ulteriormente la possibilità che si possano creare degli idrati al proprio interno. L'iniezione avviene a valle dell'espansione del gas e il si-

stema viene munito di un'unità di rigenerazione del glicol associato all'acqua in uscita.

Se le pressioni di arrivo del gas non sono sufficienti affinché l'espansione raggiunga temperature desiderate, l'impianto può essere aiutato da un ciclo di refrigerazione esterno a freon o propano. In questo caso si parlerà di disidratazione per raffreddamento con refrigerante o CRC (*Compression Refrigeration Cycle*) e la temperatura di separazione viene ottenuta con uno scambiatore (*chiller*) in cui il fluido refrigerante evapora a bassa temperatura e sottrae calore al gas da trattare. Le altre componenti dell'unità di trattamento non differiscono dall'impianto LTS fin qui descritto.

Gli impianti di separazione a freddo sono impiegati non solo per la disidratazione del gas ma anche per il recupero degli idrocarburi superiori e pesanti in fase gassosa. Per la trattazione specifica si rimanda al paragrafo 3.3.5.

3.3.3 Disidratazione mediante assorbimento con glicol

In questo tipo di disidratazione la tipologia di glicol più utilizzata è il trietilenico o TEG ($C_6H_{14}O_4$), anche se in alcuni casi può essere impiegato il DEG o l'EG. Il TEG è preferito agli altri per la più alta temperatura di decomposizione, importante ai fini della rigenerazione del glicol. La Figura 3.6 mostra uno schema semplificato di impianto per la disidratazione con glicol. Una corrente di TEG concentrato viene iniettata nella parte superiore della colonna di disidratazione, al fondo della quale viene fatto confluire il gas naturale da trattare. Il contatto col gas del glicol, altamente igroscopico, con più stadi di equilibrio in controcorrente porta alla disidratazione della corrente gassosa in uscita alla testa della colonna di assorbimento. Il TEG umido, cioè diluito in acqua, giunge al fondo della colonna e viene raccolto e inviato all'impianto di rigenerazione. Il recupero avviene tramite distillazione della soluzione. La colonna di rigenerazione è divisa in due parti dalla sezione di alimentazione del glicol, dove la parte superiore è definita di rettifica, quella inferiore di arricchimento. Il TEG condensato viene preriscaldato tramite serpentina installata all'interno della colonna di rigenerazione, che funge da

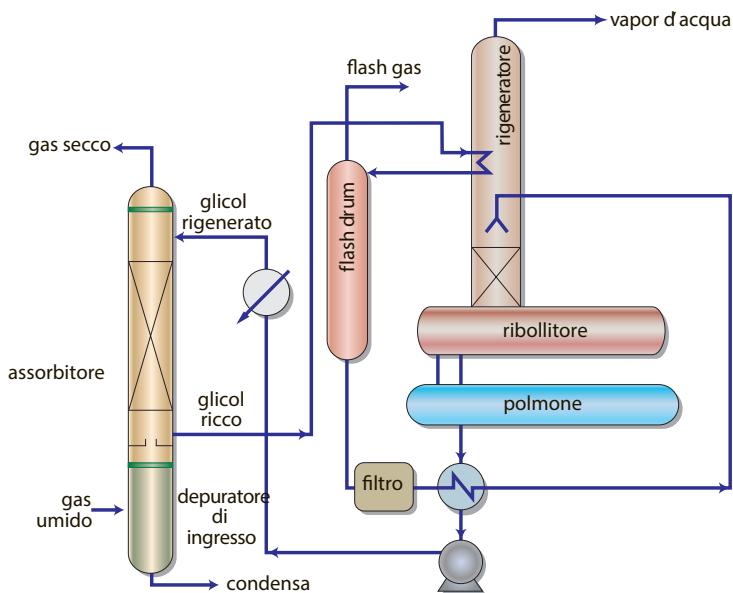


Figura 3.6: Schema semplificato di disidratazione con glicol (Bianco 2005a).

condensatore per abbattere le perdite di TEG.

Prima dell'immissione il TEG ricco viene convogliato in una camera di flash o *flash drum*, nel quale i gas associati vengono recuperati tramite espansione a bassa pressione alla testa del separatore.

Dopo un eventuale passaggio tramite filtri a maglia e a carboni attivi, il TEG ricco giunge alla colonna di rigenerazione, riscaldato tramite ribollitore di fondo solitamente di tipo *kettle*. La temperatura del bollitore varia in funzione del tipo di glicol utilizzato: nel caso di utilizzo di TEG la temperatura è leggermente superiore ai 200°C in quanto ai 207°C il TEG tende a degradare, con DEG e EG le temperature operative scendono in quanto degradano attorno ai 165°C.

Per il riscaldamento si possono utilizzare vari sistemi (come tubi di fiamma e tubi di fumo immessi nel bagno da scaldare, fascio tubiero tradizionale, riscaldatore elettrico a resistenze corazzate, olio caldo (*hot oil*)), l'installazione deve avere comunque un occhio di riguardo sulla distribuzione della temperatura, ovvero il riscaldamento deve essere uniforme su tutta la superficie della camera di rigenerazione.

Il TEG rigenerato cede gran parte del calore passando nello scambiatore carica-effluente, viene pompato alla pressione di assorbimento e raffreddato alla testa della colonna di assorbimento.

Il trattamento continuo di disidratazione per glicol risulta essere molto semplice e il sistema di rigenerazione permette di raggiungere degli ottimi valori di concentrazione finale di TEG (solitamente attorno al 98%). Se si vogliono ottenere concentrazioni maggiori, occorrono dei processi di rigenerazione spinta con le quali i valori sono prossimi al 99,98%. I processi di rigenerazione spinta più comuni sono l'installazione di colonna di *stripping* con gas (*dryer*), la rigenerazione sottovuoto (pressioni prossime a 0,1 bar) o i sistemi Drizo (utilizzo di gas di *stripping* ottenuto vaporizzando composti liquidi mediante un adeguato serpantino di riscaldamento).

3.3.4 Disidratazione mediante adsorbimento con setacci molecolari

Nel caso in cui si voglia avere una disidratazione pressoché totale si può disidratare la corrente gassosa tramite adsorbimento a letto solido. L'acqua e alcuni inquinanti polari come CO₂, H₂S e mercaptani sono adsorbiti da zeoliti, cristalli altamente porosi appartenenti alla classe degli alluminosilicati. Essi hanno caratteristiche del tutto simili alle argille naturali: agiscono come un filtro molecolare (*molecular sieve*), lasciando passare il gas e tenendo le molecole polari. I cristalli di zeolite sono mischiati a dei leganti a base argillosa per ottenere i letti molecolari. L'adsorbimento è reversibile e i cristalli di zeolite possono essere rigenerati: le molecole adsorbite possono essere rilasciate in condizioni di alta temperatura o basse pressioni (Grace Catalysts Technologies 2010).

Un tipico impianto di disidratazione è composto da due o più colonne di adsorbimento a setacci molecolari (solitamente tre, due in funzione e una in rigenerazione) e da un riscaldatore di gas di rigenerazione. L'adsorbimento di acqua si ottiene facendo confluire la corrente gassosa dall'alto verso il basso (*down flow*) e il gas secco, in uscita dalla parte inferiore, viene immesso

direttamente in rete. La rigenerazione dei setacci molecolari avviene tramite *stripping*: il gas caldo di rigenerazione viene fatto fluire in senso opposto rispetto a quello di adsorbimento (*up flow*). L'aumento di temperatura consente la rimozione delle molecole polari adsorbite dai cristalli di zeolite e si associano alla corrente gassosa calda. Il gas di rigenerazione in uscita viene raffreddato e l'acqua viene separata per condensazione, mentre il gas viene riciclato verso i letti molecolari in funzione.

I setacci molecolari sono impiegati non solo per la disidratazione del gas ma anche per prodotti liquidi leggeri come GPL e condensati recuperati tramite LTS.

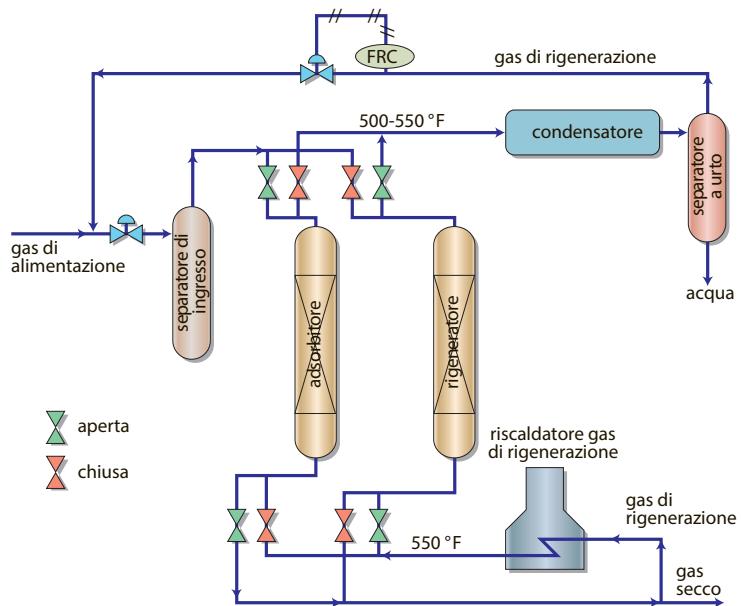


Figura 3.7: Schema di disidratazione a due letti (Bianco 2005a).

3.3.5 Degasolinaggio

Il degasolinaggio viene effettuato per rispettare le specifiche del punto di rugiada degli idrocarburi, utili a garantire degli standard di trasporto nella rete di distribuzione. Il condensato, anche definito gasolina, è un liquido che si ricava dalle frazioni meno volatili del gas come propano, butano, pentano e

altri idrocarburi superiori (Tabella 3.3). La composizione della gasolina varia notevolmente a seconda della provenienza: gas associato a greggio, gas da giacimento a gas condensato, gas da giacimenti a gas. La gasolina si trova in fase gassosa alle condizioni di giacimento e in fase liquida alle condizioni di superficie. Il suo aspetto è quello di benzina o petrolio leggero, il colore può variare dal bianco paglierino, all'azzurro e rossastro. Il processo più semplice

Tabella 3.3: Composizione centesimale stimata di gasolina da gas naturale tramite distillazione (Anderson et al. 1924).

Componenti	% in volume
Propano e butano	20
Isopentano	13
N-pentano	17
Isoesano	9
N-esano	15
Isoeptano	8
N-eptano	12
Ottani	4
Olio assorbito	2

e più impiegato per il degasolinaggio è basato sulla refrigerazione del gas. In particolare si fa riferimento alla separazione per raffreddamento per espansione (LTS) o per raffreddamento con refrigerante (CRC), impianti del tutto similari a quelli impiegati per la disidratazione.

Nell'unità di separazione a freddo il gas viene condensato mediante refrigerazione. Il processo è sempre bifase e la separazione acqua-idrocarburi (acqua eventualmente associata a glicol) avviene a valle tramite separatore bifase. In uscita dal separatore a freddo, l'acqua viene convogliata e trattata all'esterno mentre il condensato viene stabilizzato. La separazione gas-liquido a freddo in questo caso richiede sistemi di abbattimento delle goccioline più raffinati rispetto alla semplice materassina filtrante, poco indicata a causa della possibile formazione di cristalli di idrati e paraffina. L'impianto di se-

parazione a freddo è indicato più per il trattamento dei condensati che per la semplice disidratazione poiché la variazione di fase degli idrocarburi, al contrario dell'acqua, risente delle condizioni di pressione.

3.4 Altri trattamenti

A seconda della composizione del gas di giacimento, il trattamento del gas naturale prevede ulteriori processi al fine di renderlo a specifica.

Il processo di addolcimento consiste nella rimozione dal gas naturale di gas acidi come CO_2 e H_2S e consiste nell'assorbimento di tali sostanze mediante soluzioni alcaline. La reazione si basa quindi sulle reazioni di neutralizzazione tra acido debole e reagente basico. Requisito fondamentale del processo è la sua reversibilità. I reagenti più comunemente utilizzati sono le alcanolammine, ammine associate a gruppi alcanoli, gruppi alchilici o alcanoli a seconda che si tratti di un'ammina primaria, secondaria o terziaria. Le ammine accettano un protone sotto forma di ione idrogeno H^+ tramite una reazione altamente esotermica. Trattandosi di fase liquida, il rendimento del processo di addolcimento dipende dalla velocità di reazione e dal passaggio della fase gassosa a quella liquida. La superficie di contatto tra le due fasi è proporzionale al rendimento di processo. La Figura 3.8 mostra uno schema semplificato del trattamento di assorbimento con relativa rigenerazione delle alcanolammine. Il gas acido viene in contatto con la soluzione amminica e raffreddato nella colonna di assorbimento. Essendo la reazione altamente esotermica, le basse temperature favoriscono l'assorbimento. La soluzione al fondo della colonna viene convogliata in una camera di flash dove si separa parte del gas associato al liquido e la soluzione viene trasferita all'impianto di rigenerazione. Le alcanolammine sono rigenerate tramite stripping in corrente di vapore. Le ammine soffrono in modo particolare di degradazione termica, perciò la temperatura di rigenerazione è limitata e si preferisce l'utilizzo di soluzioni molto diluite.

L'addolcimento del gas può essere effettuato anche tramite soluzioni di

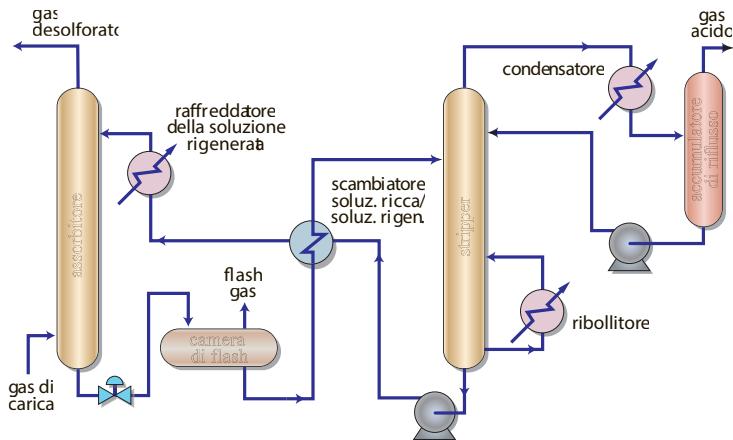


Figura 3.8: Lavaggio amminico (Bianco 2005a).

carbonato potassico a caldo: al vantaggio del processo di assorbimento non esotermico (minor dispendio energetico dovuto al raffreddamento della colonna di assorbimento e minor esigenza di grandi superfici di scambio), si contrappone la necessità di reintegrare l'acqua che per alte temperature satura il gas trattato.

La rimozione parziale dei gas acidi al gas naturale si può ottenere tramite membrane semipermeabili: la corrente gassosa viene frazionata sulla base della permeabilità selettiva di alcuni composti polari rispetto agli idrocarburi.

Altri trattamenti che il gas naturale può subire sono il lavaggio del gas di coda, l'assorbimento fisico, la rimozione di H_2S tramite processi ossidativi, i filtri a carboni attivi.

3.5 Apparecchiature di processo e impianti particolari

I processi fin qui descritti possono realizzarsi tramite un impianto di trattamento, l'insieme delle infrastrutture utili a rendere il gas erogato dai giacimenti conforme ai requisiti di pressione, temperatura e qualità necessari al-

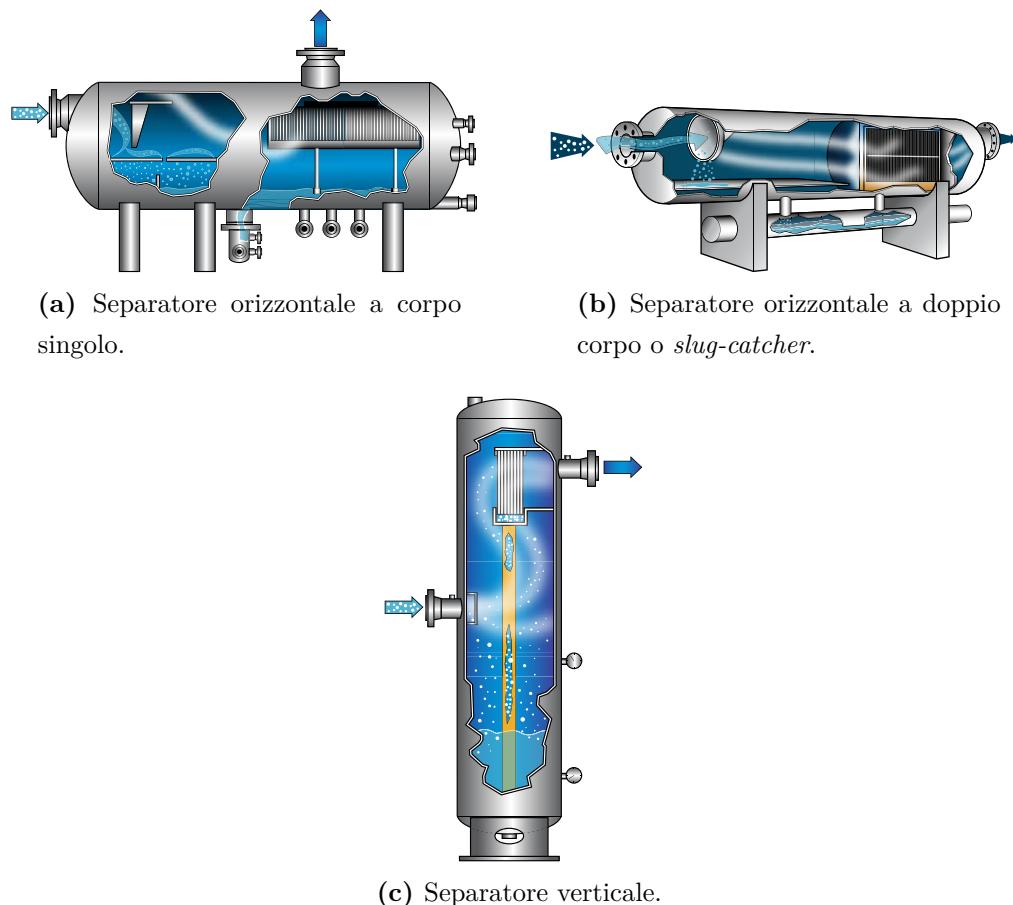
l'immissione nella rete di distribuzione. L'impianto di trattamento è quindi progettato in base alle caratteristiche fisico-chimiche del gas naturale prodotto e alle specifiche di vendita. Nel seguente capitolo sono descritte le apparecchiature con le quali si realizzano i trattamenti richiesti.

3.5.1 Separatori

I separatori sono gli apparecchi più utilizzati per la separazione di un flusso combinato liquido-gas dei suoi due componenti. I separatori sono classificati in base alla loro configurazione operativa:

- **separatori orizzontali** (Figura 3.9a): sono estremamente economici quando vengono trattati volumi importanti di gas. La disposizione orizzontale garantisce maggiori rendimenti rispetto a quella verticale per via del maggior tempo di permanenza delle goccioline nel separatore. Un separatore orizzontale a doppio corpo è definito *slug-catcher* (Figura 3.9b), con il corpo superiore completamente libero e il corpo inferiore che funge da polmone del liquido. La configurazione dello *slug-catcher* permette di lavorare con alte portate e bruscamente variabili, a differenza del separatore singolo. I separatori a singolo o doppio corpo non sono particolarmente indicati per il trattamento di fluidi contenenti sabbia o fango, a causa della bassa capacità di eliminazione dei depositi e quindi l'accumulo degli stessi sul fondo;
- **separatori verticali** (Figura 3.9c): nonostante le minori performance rispetto ai separatori orizzontali, sono comunque impiegati nell'ambito del trattamento del gas naturale quando i flussi sono caratterizzati da fango, sabbia o gas associato a olio. Inoltre, i separatori verticali sono preferiti in ambito off-shore, vista la scarsa disponibilità di spazio;
- **separatori sferici**: impiegati per la loro compattezza, i separatori sferici rappresentano un giusto compromesso tra i rendimenti di un separatore orizzontale e le ridotte dimensioni di ingombro del separatore

verticale. Attualmente i separatori sferici sono poco impiegati in ambito tecnico-progettuale.



(a) Separatore orizzontale a corpo singolo.

(b) Separatore orizzontale a doppio corpo o *slug-catcher*.

(c) Separatore verticale.

Figura 3.9: Separatori orizzontali e verticali bifase dotati di dispositivi snebbianti (Peerless Mfg. Co 2009).

I separatori possono essere forniti di elementi interni come deflettori, dighe, materassina snebbiante e/o pacco lamellare (Figura 3.10b) nel caso in cui si voglia aumentare la performance di separazione per semplice gravità. A seconda della configurazione i separatori possono separare la fase liquida dalla fase gassosa oppure riescono a operare una separazione spinta: si parla in questo caso di separatori bifase o separatori trifase (Figura 3.10a).

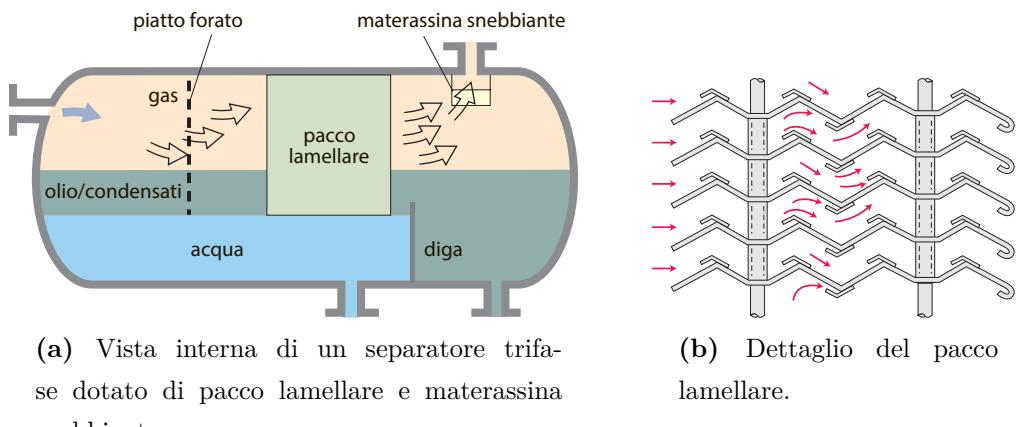


Figura 3.10: Separatore trifase e del pacco lamellare (Bianco 2005b).

3.5.2 Scambiatori di calore

Numerose sono le tipologie di scambiatori impiegati nell'industria del gas naturale.

I più semplici sono gli scambiatori a fasci tubieri e mantello (*shell-and-tubes*, Figura 3.11), dove il dispositivo viene attraversato dalle due correnti sul "lato mantello" e sul "lato tubi". Lo scambiatore a fasci tubieri garantisce ottime performance grazie all'estesa superficie di scambio di cui è dotato.

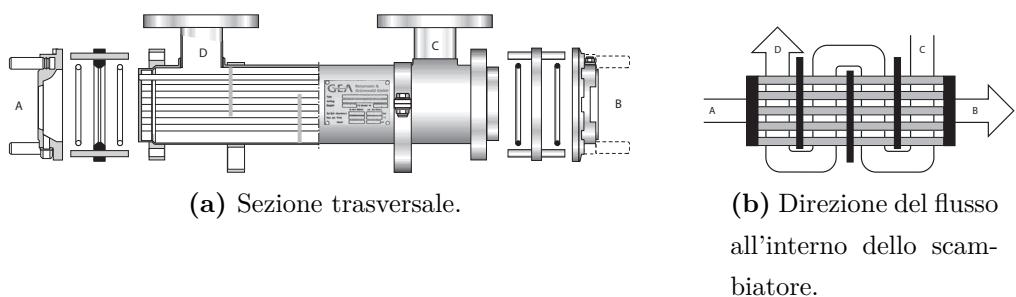


Figura 3.11: Scambiatore di calore a fasci tubieri (Guadagni 2003).

Altro dispositivo di scambio termico è lo scambiatore a piastre (Figura 3.12). Questa tipologia di scambiatore prevede un pacco di piastre rettangolari tutte uguali, ottenute da lamiera per stampaggio secondo diverse forme di corrugazione superficiale. I fluidi lambiscono le piastre attraverso

canali che si formano tra esse. Le piastre sono sostenute da un telaio e tenute in pressione da quest'ultimo. Hanno il vantaggio di raggiungere coefficienti di scambio elevati e sono molto flessibili in caso di modifiche progettuali. Inoltre sono molto impiegati in campo off-shore grazie al poco spazio richiesto per l'installazione. Negli ultimi anni hanno preso piede i PCHE (*Plate Compact Heat Exchanger*), un'evoluzione degli scambiatori a piastre, molto richiesti per via della loro ulteriore riduzione di ingombro.

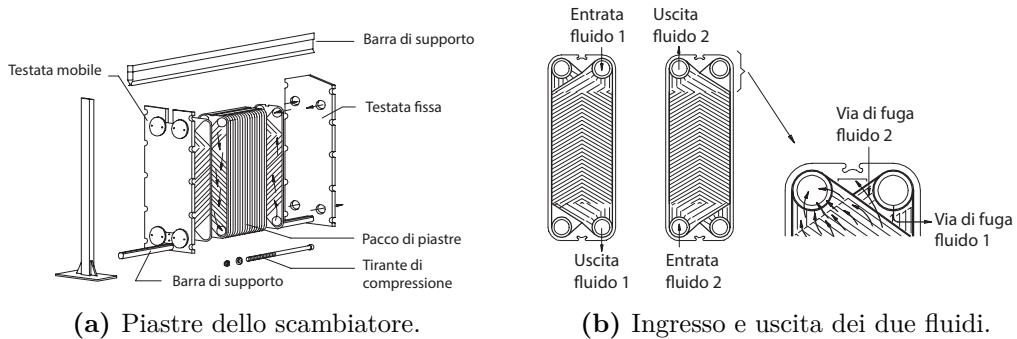


Figura 3.12: Scambiatore a piastre (Guadagni 2003).

3.5.3 Compressori

Il compressore è una macchina operatrice che opera su un fluido comprimibile con l'obiettivo di aumentarne la pressione. I compressori possono classificarsi in:

- compressori volumetrici o a flusso intermittente;
- compressori dinamici o a flusso continuo.

La scelta di un idoneo impianto di compressione si realizza tramite il calcolo del rapporto di compressione richiesto, cioè il rapporto tra la pressione di mandata e quello di aspirazione. Il raggiungimento della pressione finale può avvenire in un unico salto oppure tramite più stadi in serie (*booster*): si parla

quindi rispettivamente di compressori monostadio o compressori multipli. In caso di compressione multistadio, il gas naturale viene raffreddato ad ogni step tramite refrigerazione interstadio fino alla temperatura di ingresso.

Compressori volumetrici

I compressori volumetrici o a flusso intermittente sono macchine che riducono il volume del gas naturale per aumentare la pressione. I compressori volumetrici possono essere classificati a loro volta in alternativi e rotativi.

Nei compressori volumetrici alternativi (Figura 3.13a) il processo di compressione è realizzato da un pistone che realizza una "corsa" all'interno di un cilindro dotato di valvole di aspirazione e mandata. In una prima fase il pistone porta a compressione il gas all'interno del cilindro che viene poi convogliato alla mandata. Quando il cilindro torna in posizione originale, la riduzione di pressione all'interno del cilindro porta all'apertura delle valvole di ingresso e al ritorno delle condizioni iniziali. Una volta chiuse le valvole di aspirazione il ciclo si ripete. I compressori alternativi sono utilizzati nella compressione di gas naturale per basse portate e alte pressioni. Gli svantaggi dei compressori alternativi sono legati ai costi di manutenzione non trascurabili e alla creazione di vibrazioni indesiderate e spinte orizzontali alternate. La Figura 3.13c mostra un compressore alternativo a cilindri contrapposti, spesso usato in questo ambito.

I compressori volumetrici rotativi spostano e comprimono il gas naturale tramite l'azione di elementi in moto rotatorio. Nell'ambito del trattamento del gas naturale sono impiegati compressori volumetrici rotativi a vite (*rotary screw*, Figura 3.13d) costituiti da due rotorì accoppiati, di forma elicoidale, che ruotano comprimendo e spostando allo stesso tempo il gas. L'efficienza della macchina dipende in gran parte dai giochi tra i due rotorì. I compressori a vite sono utilizzati per gas a basse pressioni, permettono di raggiungere alti rapporti di compressione con un singolo stadio e il loro utilizzo è ormai consolidato negli impianti frigoriferi.

Compressori dinamici

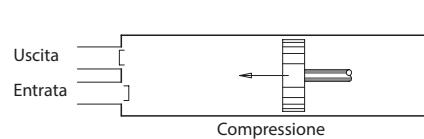
I compressori dinamici sono macchine a flusso continuo in cui la compressione si realizza accelerando l'aria quando questa passa attraverso un elemento rotante ad alta velocità. L'energia cinetica acquisita si trasforma in energia di pressione in parte nell'elemento rotante e in parte in un diffusore statico a valle della girante. I compressori dinamici possono essere centrifughi o assiali.

Nei compressori centrifughi (Figura 3.13e) il gas viene accelerato in una girante e il flusso principale ha direzione radiale. Questi compressori possono essere monostadio o multistadio (Figura 3.13f) e possono gestire portate di gas elevate con notevole flessibilità e mantenendo la pressione di manda costante.

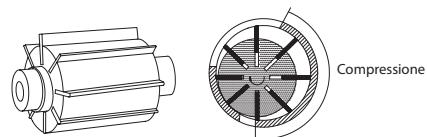
I compressori assiali provocano l'accelerazione del gas tramite un rotore palettato e il flusso principale acquisisce direzione assiale. Questi compressori sono impiegati soprattutto per la compressione dei fluidi frigoriferi abbinati alla liquefazione dello stesso.

3.5.4 Espansori

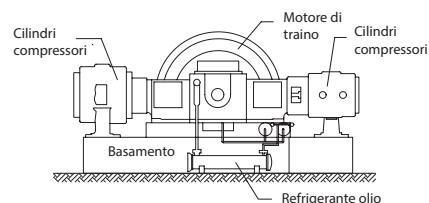
Gli espansori più comunemente utilizzati in questo ambito sono le turbine a impulso radiale e le turbine assiali. Le turbine a impulsi radiali sono largamente utilizzate e solitamente queste macchine sono molto compatte. Hanno come unico svantaggio il rapporto di espansione limitato, al fine di mantenere un rendimento elevato. Le turbine assiali invece sono impiegate per potenze elevate e portate di gas rilevanti. L'impiego degli espansori non è oggi una prima scelta nel trattamento del gas naturale ma è un ottima alternativa nel campo della refrigerazione. Al contrario dei sistemi tradizionali (a effetto Joule-Thomson o refrigerazione meccanica), gli espansori sono macchine semplici e compatta e in alcuni casi non richiedono l'impiego di potenza esterna al ciclo.



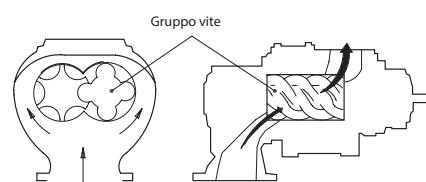
(a) Schema del compressore volumetrico alternativo.



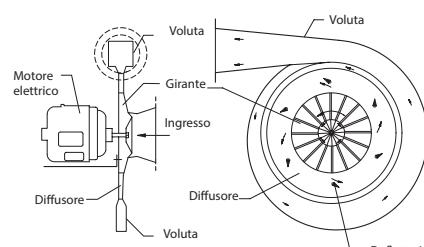
(b) Schema di compressore rotativo a palette.



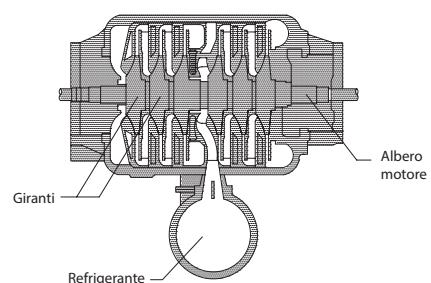
(c) Compressore alternativo a cilindri contrapposti.



(d) Compressore a vite.



(e) Compressore centrifugo monostadio.



(f) Compressore centrifugo multistadio di processo.

Figura 3.13: Compressori (Guadagni 2003).

3.5.5 Impianti frigoriferi

Molti processi di trattamento del gas si basano sulla refrigerazione. Il ciclo frigorifero tramite refrigerazione meccanica (Figura 3.14) si realizza tramite la condensazione di un fluido (solitamente freon) in pressione, il quale viene poi fatto espandere nell’evaporatore (*chiller*) attraverso una valvola. All’uscita dall’evaporatore il fluido refrigerante riportato alla pressione originaria tramite un compressore per poi tornare in fase liquida tramite il condensatore. Il fluido refrigerante è scelto in base alla temperatura di evaporazione che si intende raggiungere. Spesso il ciclo frigorifero può svilupparsi in più stadi, nel caso in cui si vogliano raggiungere temperature molto basse.

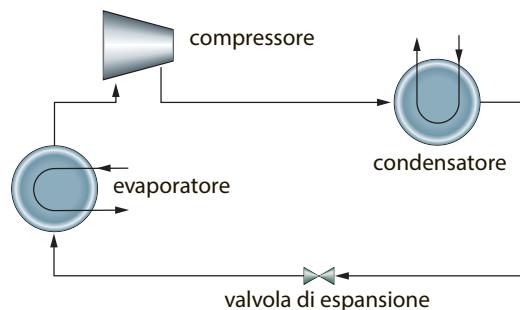


Figura 3.14: Refrigerazione meccanica (Bianco 2005a).

Tutti i processi descritti in questo capitolo fanno riferimento al trattamento del gas, per poi essere immesso nella rete nazionale. Nel trasporto di gas tra i campi di produzione e le centrali di trattamento non si necessitano di processi di abbattimento spinti delle sostanze associate. In generale le aree pozzo sono dotati di abbattitori per la separazione gravimetrica dell’acqua e sistemi di inibizione di idrati, che consistono nel riscaldamento del flusso gassoso oppure nell’iniezione di glicol in condotta. L’acqua rimane quindi presente del flusso gassoso e può accumularsi negli avvallamenti della condotta, generando così una contropressione. Le cadute di pressione nel trasporto di un fluido in condotta non permettono di operare in modo adeguato e si cerca di diminuire il valore di contropressione tramite diverse soluzioni tecniche. In campo industriale vengono impiegati degli scovoli o pig, dispositivi

cilindrici o sferici per pulire, ispezionare e misurare le condotte. Nel prossimo capitolo saranno trattate le diverse tipologie di scovolo e le procedure di piggaggio di una condotta in pressione.

Capitolo 4

Sistemi di piggaggio di condotte in pressione

Il piggaggio, detto anche *pigging*, è un'applicazione nella quale un dispositivo cilindrico o sferico chiamato scovolo (o pig), opportunamente dimensionato, viene spinto all'interno di una condotta tramite variazioni indotte di pressione e flusso del mezzo presente all'interno, tramite l'introduzione di un mezzo esterno o tramite movimento meccanico. Lo scovolo viene immesso in condotta al fine di pulire, ispezionare, dosare inibitori chimici lungo la tubazione oppure isolare delle sezioni specifiche della rete.

L'origine del termine inglese pig è tuttora incerto: se da una parte viene proposto come l'acronimo di *Pipeline Intervention Gadget*, dall'altra si fa riferimento al rumore che provoca lo scorrimento dello scovolo in condotta, simile al verso di un maiale (Varghese 2011).

Durante gli anni '40 negli Stati Uniti il piggaggio aveva come fine principale la rimozione di paraffina per migliorare l'efficienza delle condotte a olio, quindi veniva usato per aumentare la produzione e sopprimere all'alta domanda legata alle attività belliche della Seconda Guerra Mondiale.

Nel mondo oggi il piggaggio è impiegato per numerosi scopi e la strumentazione è progettata dagli ingegneri in base alle necessità legate all'applicazione. Il seguente capitolo offre una panoramica riguardo al piggaggio delle condot-

te in pressione dove vengono mostrate le varie configurazioni degli scovoli, le finalità dell'applicazione, le procedure operative e la valutazione di soluzioni in caso di blocco del pig in linea.

4.1 Configurazione degli scovoli

L'assemblaggio e configurazione dello scovolo di servizio prevede numerose soluzioni:

- **a mandrino** (Figura 4.1a): gli elementi dello scovolo sono assemblati sul corpo centrale tramite numerosi bulloni;
- **a bullone singolo** (Figura 4.1b): simile allo scovolo a mandrino, gli accessori del pig in questo caso sono inseriti tramite un'unica bullonatura longitudinale;
- **a telaio fisso** (Figura 4.1c): sia le tenute che gli elementi guida sono rivestiti da un corpo unico di poliuretano;
- **a schiuma** (Figura 4.1d): solitamente con struttura aperta di poliuretano, questi scovoli sono disponibili a diversa densità, a seconda dell'applicazione richiesta. Il rivestimento aumenta la resistenza a usura e la stabilità dell'utensile;
- **sfera** (Figura 4.1e): possono essere piene o riempite con aria, acqua o glicol, possono essere usate come tamponi o rimozione liquidi;
- **articolato** (Figura 4.1f): composto da due o più scovoli uniti tra loro con sistemi di accoppiamento universale. Rappresenta la configurazione base degli scovoli intelligenti;

Gli scovoli a mandrino e a bullone singolo si adattano alla richiesta specifica grazie all'installazione di diversi dispositivi sul corpo centrale. e spazzole (Figura 4.2a) sono impiegate in primo luogo per la rimozione di depositi compatti come calcare e prodotti da corrosione. Alcune spazzole

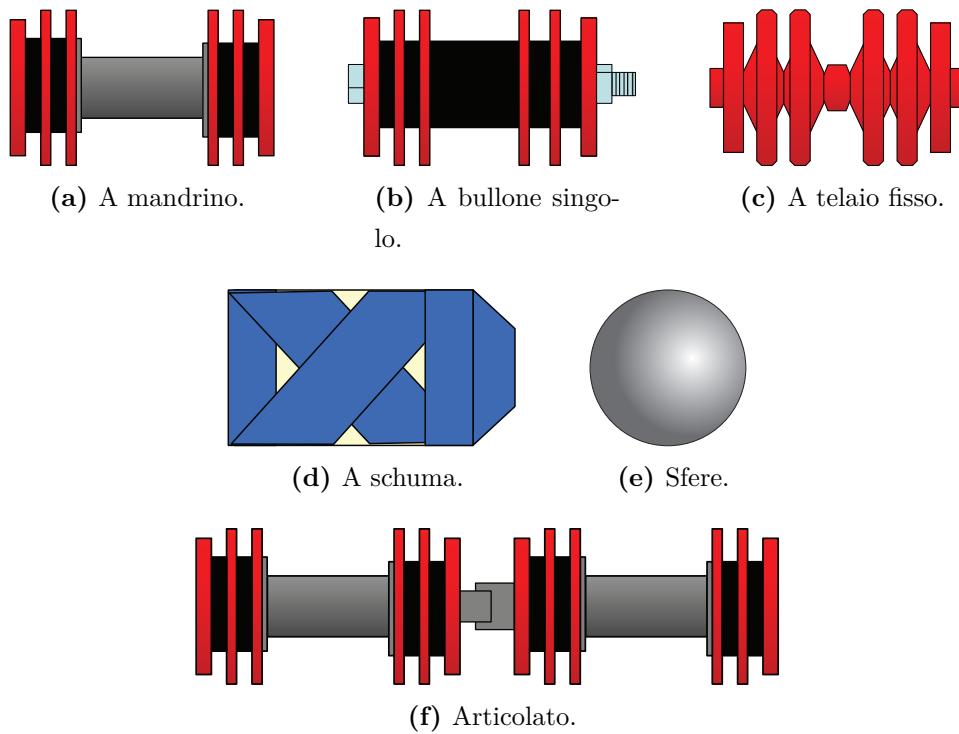


Figura 4.1: Configurazione dello scovolo (Davidson 2002).

sono specifiche per favorire l’azione degli inibitori di corrosione e dei biocidi in condotta.

Le guarnizioni a tazza (Figura 4.2b) sono dispositivi di tenuta idraulica che consentono lo spostamento unidirezionale dello scovolo attraverso la spinta di un fluido da monte. Sono utilizzati anche come dispositivi di *batching*. Le coppelle coniche rappresentano una valida alternativa alle guarnizioni a tazza, differiscono da quest’ultime per la convessità della tenuta rispetto alla parete della condotta.

I dischi (Figura 4.2c) vengono utilizzati come tenute idrauliche, per la pulizia e come organi di supporto. A differenza delle guarnizioni a tazza e le coppelle coniche, uno scovolo dotato di dischi può muoversi in entrambe le direzioni. Le lame (Figura 4.2d), tramite l’azione di taglio, provvedono alla rimozione di depositi morbidi come paraffina e fanghi, vengono quindi impiegate in condotte dedicate al trasporto di olio.

L’inserimento di potenti magneti (Figura 4.2e) sulla circonferenza permette allo scovolo non solo l’asportazione di materiale feroso dalla condotta, ma anche di attivare i segnalatori posti all’esterno della condotta per monitorarne il tragitto.

Lo scovolo può essere dotato inoltre di accessori per la misurazione: possono essere di varia natura (calibri, dischi misuratori, dispositivi magnetici, etc.) e consentono l’ispezione interna della condotta.

4.2 Obiettivi del piggaggio

Il piggaggio di una condotta viene oggi eseguito in tutte le fasi di vita di un impianto di processo. Data la sua versatilità, è di consuetudine per tutti i settori dell’industria di processo, perciò non esistono delle classificazioni universali degli scovoli impiegati. Una generica distinzione tra pig può essere fatta in base all’operazione richiesta: si parla quindi di scovoli di servizio, scovoli per l’ispezione interna e scovoli gel.

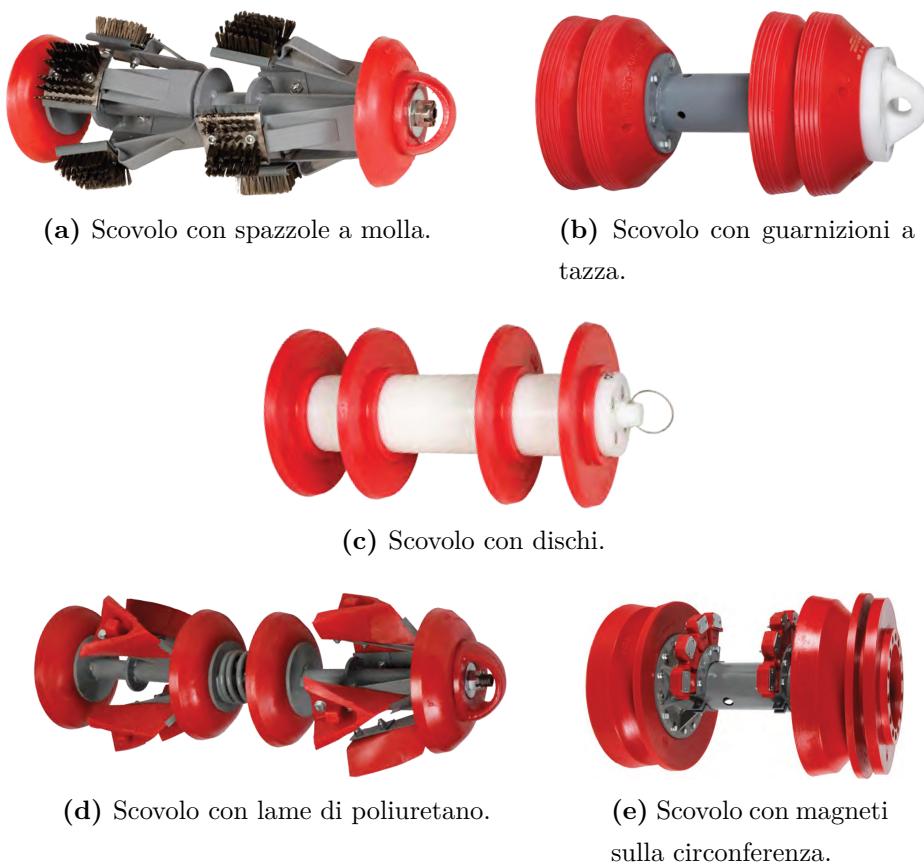


Figura 4.2: Componenti tipici di uno scovolo di servizio (T.D. Williamson, Inc. 2015).

4.2.1 Scovoli di servizio

Qui di seguito sono elencati i motivi legati generalmente all'impiego di scovoli di servizio:

- **pulizia della condotta:** utile per migliorare le condizioni di flusso;
- **separazione dei fluidi o *batching*:** scovoli di separazione tra diversi prodotti chimici da applicare in condotta;
- **spiazzamento della condotta:** specialmente nelle condotte a gas, gli scovoli possono essere utilizzati per spiazzare delle formazioni liquide indesiderate in condotta.

4.2.1.1 Pulizia

Gli scovoli pulenti sono impiegati per mantenere dei livelli di efficienza minimi in condotta. Nel settore degli idrocarburi, qualunque riduzione di portata corrisponde a un mancato introito giornaliero. La riduzione della portata è legata all'attrito e a fattori fisici. Nelle condotte a gas i problemi di produzione sono legati alla presenza di elementi corrosivi, detriti e depositi, polveri e condensati. Nel caso del greggio le condotte risentono della presenza di sabbia e paraffina adesa alle pareti interne della tubazione.

Si valuta l'efficienza di una condotta tramite considerazioni tecniche su flusso, cadute di pressione e costi operativi. Nel momento in cui la condotta necessita di una pulizia interna, si inserisce uno scovolo lungo il tratto interessato.

La configurazione migliore del pig pulente consiste in dischi, guarnizioni a tazza e dispositivi pulenti rappresentati da spazzole radiali a molla o lame in poliuretano (Figura 4.4a). I dischi consentono di spingere via i residui solidi oltre a fornire un buon supporto, guarnizioni provvedono alla tenuta. Le spazzole consentono la rimozione di ruggine, detriti e altri residui solidi; le lame sono impiegate in condotte a olio, grazie alla maggiore efficacia sulla paraffina e la facilità di pulizia al termine dell'applicazione (Figura 4.4b).

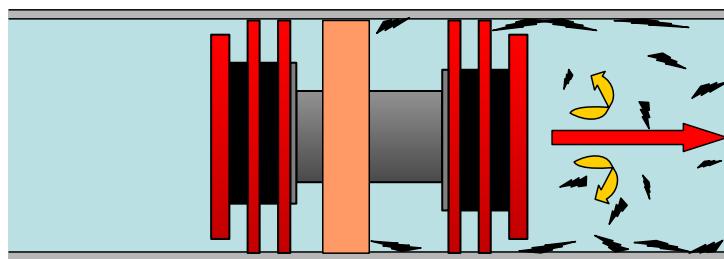


Figura 4.3: Scorrimento dello scovolo di pulizia in condotta e rimozione dei depositi solidi in condotta (Davidson 2002).

Nella pulizia di condotte con mezzi liquidi gli scovoli possono essere dotati di *bypass* (Figura 4.4c), ugelli longitudinali che convogliano del liquido in pressione da monte a valle, evitando così il deposito dei solidi sul fondo e riducendo la velocità di scorrimento del dispositivo.

Gli scovoli di pulizia tradizionali non agiscono propriamente sul materiale metallico come aste, bulloni o utensili lasciati dopo la messa in opera della condotta. Il modo più efficace consiste nell'installazione di nastri magnetici lungo il corpo dello scovolo (Figura 4.4d).

4.2.1.2 Spiazzamento

Per spiazzamento della condotta si intende la completa sostituzione di un mezzo fluido con un altro. Gli scovoli di spiazzamento o separazione, tramite meccanismi di spinta e di tenuta, consentono di effettuare queste operazioni. Numerose sono le operazioni che necessitano l'impiego di questi dispositivi. I test di tenuta idraulica di una condotta prevedono lo spurgo totale, il riempimento con acqua e la pressurizzazione della linea per un determinato periodo di tempo tramite scovoli di spiazzamento. Altri impieghi sono la separazione tra idrocarburi e gas inerte per poter effettuare riparazioni sul campo o lo spiazzamento di liquidi indesiderati da linee a gas.

La configurazione generica è rappresentata dagli scovoli a quattro tazze di tenuta, tenute in contatto con le pareti della condotta. Per ovviare alle variazioni di diametro interno, si utilizzano delle guarnizioni a tazza a più labbra



(a) Scovolo con spazzole circolari, guarnizioni a tazza e dischi.



(b) Scovolo a lame con paraffina adesa.



(c) Ugelli di *bypass*.



(d) Scovolo per la pulizia dei residui metallici.

Figura 4.4: Dispositivi di pulizia delle condotte (T.D. Williamson, Inc. 2015).

di tenuta (*multi-lipped cup*, Figura 4.5a).

Gli scovoli a dischi bidirezionali (Figura 4.5b) sono tipicamente usati nelle operazioni di riempimento e spiazzamento acqua in condotta, associati quindi ai test di tenuta. La possibilità di agire in direzione doppia consente la ricollocazione del dispositivo in posizione iniziale nel caso in cui si preveda un possibile blocco in condotta.

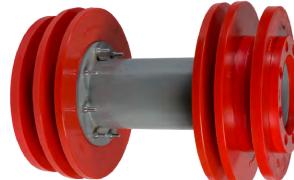
Le sfere (Figura 4.5c) sono la soluzione ideale per la rimozione di liquidi da linee a gas. I sistemi di piggaggio a sfere sono progettati per il lancio e la ricezione in automatico, con un numero di sfere che può variare in base alle richieste specifiche. Sul punto di ricezione, si prevede l'installazione di uno *slug catcher* per ovviare al volume di liquido associato alle sfere. Le condotte a gas sono normalmente progettate per l'uso di sfere ma ciò non vuol dire che possano essere piggabili da scovoli convenzionali.

Schiume a bassa densità senza rivestimento (Figura 4.5d) sono impiegate per asciugare la condotta dopo l'operazione di spiazzamento d'acqua. Questi pig

hanno come unico svantaggio la possibilità di potersi bloccare in opera.



(a) Guarnizione a tazza a più labbra
di tenuta.



(b) Scovolo a dischi bidirezionale.



(c) Sfere UNISPHERE™.



(d) Scovoli a schiuma senza rivestimento a bassa densità.

Figura 4.5: Diverse tipologie di trappole di lancio (T.D. Williamson, Inc. 2015).

4.2.1.3 Separazione dei fluidi

In alcune applicazioni si richiede l'immissione di uno o più prodotti separata-mente. Nella condotta si possono creare delle condizioni di "contaminazione" a causa di:

- regime di flusso;
- geometria della condotta;
- procedure operative.

Al fine di ovviare al contatto tra i diversi prodotti, si impiegano in condotta degli scovoli tampone o *batching pig*, dispositivi di tenuta idraulica in grado di evitare il contatto tra i singoli *slug*. La Figura 4.6 mostra un'applicazione

tipica: i primi due *slug* di acqua dolce provvedono alla desalinizzazione della linea precedentemente percorsa dall'acqua di mare, mentre gli *slug* di glicol permettono la deidratazione e l'inibizione degli idrati.

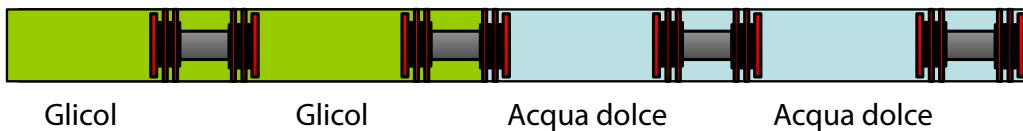


Figura 4.6: Desalinizzazione della condotta con treni di acqua dolce e glicol (Davidson 2002).

Gli scovoli impiegati per la separazione di prodotti sono gli stessi usati per lo spiazzamento: in particolar modo si parla di guarnizioni a tazza, coppelle coniche e dischi bidirezionali.

4.2.2 Strumenti di ispezione interna

Questi dispositivi provvedono a fornire informazioni sulle condizioni della condotta, così come l'estensione e la localizzazione di qualsiasi problema presente. Gli scovoli di ispezione interna più semplice sono di misurazione meccanica.

Lo scovolo a piastra spessimetrica (Figura 4.7a) è un dispositivo di misurazione molto semplice: lo strumento di misura consiste in un disco dal diametro pari al 95% di quello della condotta interna. Associato a un emettitore acustico, lo scovolo emette un segnale quando si presenta un restringimento, fornendo quindi indicazioni agli operatori per la riparazione della condotta. Lo scovolo calibro (Figura 4.7b) è utile alla misurazione della geometria interna della condotta. Un sistema di leve metalliche radiali, in questo caso definito calibro, è collegato a un dispositivo di registrazione interno, il quale tiene traccia del profilo interno della condotta in funzione della posizione.

Al fine di andare incontro a esigenze di misurazione sempre più precise, negli ultimi anni sono state sviluppate delle tecnologie che non impiegano dispositivi meccanici per l'ispezione: sono definiti scovoli intelligenti o *smart pig*.



(a) Scovolo a piastra spessimetrica.



(b) Scovolo calibro.

Figura 4.7: Scovoli di ispezione interna tradizionali (T.D. Williamson, Inc. 2015).

Scovoli intelligenti o *smart pig*

Questi scovoli sono strumenti utili all’ispezione della condotta, capaci di svolgere operazioni complesse come mappatura, misurazioni geometriche, individuazione di crepe, assottigliamento localizzato della condotta. Oggi il piggaggio intelligente è considerato un settore industriale indipendente, data l’importanza dell’applicazione.

Il concetto di piggaggio intelligente nasce nel 1963 dal settore ricerca della Shell, che brevettò un metodo di ispezione basato sulle correnti parassite.

Attualmente le due tecnologie maggiormente impiegate sono gli scovoli a dispersione di flusso magnetico (*Magnetic Flux Leakage*, MFL) e gli scovoli a ultrasuoni. Gli scovoli MFL (Figura 4.8) si basano sul principio della misurazione della dispersione di flusso magnetico legata al volume delle perdite metalliche, quindi allo spessore della parete della condotta. Questo scovolo funziona in mezzi gassosi e/o liquidi. La valutazione finale dei dati viene raffinata negli anni poiché è frutto di misurazioni indirette, legate quindi a un processo interpretativo.

L’alternativa all’MFL consiste nell’impiego di misure a ultrasuoni. In questo caso la parete della condotta viene calcolata tramite misurazione diretta, il quale rende questa tecnologia molto più affidabile rispetto al controllo della dispersione di flusso magnetico. Ha lo svantaggio di non potere essere utilizzata con mezzo gassoso: il suo impiego in questo caso prevede l’utilizzo di un mezzo liquido di riempimento prima di poter effettuare le operazioni di

misura.



Figura 4.8: Scovolo a dispersione di flusso magnetico (T.D. Williamson, Inc. 2015).

La ricerca nel settore degli scovoli intelligenti è molto attiva e le soluzioni in commercio sono innumerevoli. Fra queste troviamo i pig a neutroni, utili per rilevare nelle condotte sottomarine le sezioni non più sotterrate (*span*). Le aree a contatto con l’acqua sono soggette a maggiori fenomeni di danneggiamento. Gli *span* possono essere rilevati da strumenti esterni alla condotta; attraverso lo scovolo a neutroni si riducono il numero di indagini e si migliora l’accuratezza dell’analisi.

Altri esempi includono delle videocamere montate sullo scovolo, impiegate per l’ispezione interna visuale oppure scovoli per il rilevamento di curvature in condotte nelle aree artiche, corrispondenti a sollecitazioni locali causate dalle differenze di temperatura.

4.2.3 Scovoli gel

In questo caso non si parla di dispositivi di forma propria, bensì di sistemi a base di liquidi gelificati (Figura 4.9) che sono sviluppati per le operazioni ausiliare in condotta come avvio della produzione, operazioni di supporto agli scovoli tradizionali o programmi di mantenimento.

La maggior parte dei gel impiegati sono a base di acqua, tuttavia possono essere anche a base di glicol, metanolo o altre sostanze liquida a seconda delle esigenze tecniche.

I tipi di scovoli gel disponibili sono:

- **gel di *batching***:

- **gel per cattura di detriti;**
- **idrocarburi gelificati;**
- **gel disidratanti**

I principi applicativi degli scovoli gel vanno dalla separazioni delle diverse fasi liquide alla rimozione dei detriti, dai test di riempimento condotta allo spiazzamento dei liquidi indesiderati, fino all'impiego di sostanze chimiche come inibitori o biocidi. Importante sottolineare l'impiego del gel nello sblocco di scovoli tradizionali incastrati in condotta.

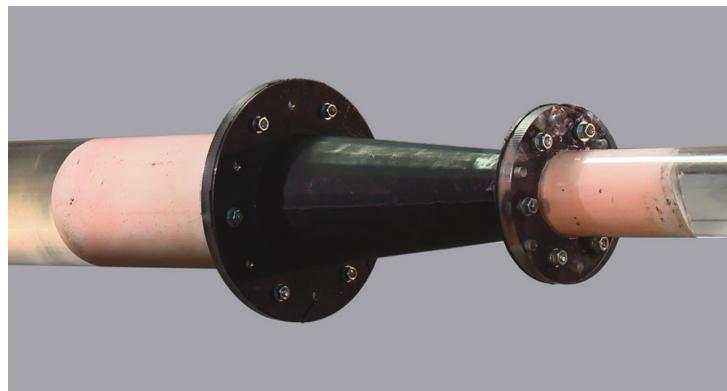


Figura 4.9: Scovo gel EVO-Pig, Aubin Ltd (Johnston 2015).

4.3 Procedure di lancio e recupero del pig

Gli scovoli possono essere inseriti direttamente in condotta tramite dispositivi a spola. Tuttavia l'immissione e il recupero del pig in condotta viene effettuata di norma tramite trappole di lancio e di ricezione. La scelta delle trappole di lancio e di ricezione dipende da numerosi fattori.

Le trappole sottomarine e quelle su terraferma hanno configurazione diversa. Si richiedono inoltre dispositivi di sicurezza addizionali al fine di garantire la sicurezza nelle operazioni. Dal rispetto della sequenza operativa nell'apertura e chiusura delle valvole della trappola dipende la probabilità di successo

dell'applicazione: un'errata apertura o regolazione di una valvola può portare al blocco dello scovolo in condotta.

Le tipologia e la dimensione dello scovolo condizionano la scelta di una trappola di lancio o di ricezione. Nel caso di impiego di sfere le trappole possono essere più corte rispetto a quelle dedicate agli scovoli a mandrino. Al contrario, con l'impiego di scovoli intelligenti, la lunghezza richiesta aumenta notevolmente.

In molti casi le operazioni di piggaggio avvengono con il lancio di più scovoli contemporaneamente: ciò prevede l'utilizzo di organi di lancio e ricezione che possano contenere tutte le unità immesse nella condotta, aumentando così la lunghezza richiesta per la trappola.

Le trappole possono essere installate in modo permanente o temporaneo. In questo caso la configurazione cambia in modo sostanziale, così come i dispositivi di chiusura. Le trappole temporanee possono avere una chiusura semplice a flange, le trappole permanenti tendono a prediligere l'utilizzo di portelloni di chiusura rapida (Figura 4.10).



(a) Chiusura a anello con morsetto.

(b) Chiusura con rivestimento filettato.

Figura 4.10: Dispositivi di chiusura a portelloni delle trappole di lancio e ricezione (T.D. Williamson, Inc. 2015).

La configurazione della trappola si adatta al metodo di lancio degli scovoli in condotta. Un treno di più pig può essere lanciato assieme oppure individualmente a intervalli stabiliti, interrompendo più volte il flusso del fluido di spinta per inserire un nuovo scovolo. Lo stesso scovolo può essere introdotto senza interrompere la produzione, pareggiando di volta in volta le condizioni

di pressione della trappola con la condotta interessata.

Una tipica trappola di lancio (Figura 4.11), a prescindere dalla configurazione, prevede sempre l'installazione di determinate valvole. La valvola di *bypass* (*mainline bypass valve*) regola il passaggio del flusso per la trappola o meno. La valvola di ventilazione (*vent valve*) consente la regolazione della pressione nella trappola, la depressurizzazione per l'inserimento dello scovolo in sicurezza e di nuovo la pressurizzazione. La valvola di drenaggio (*drain valve*) è utile al drenaggio per gravità del liquido all'interno della trappola. La valvola di piggaggio (*pigging valve*) mantiene lo scovolo all'interno della trappola fino alla sua apertura. La valvola di *kick* (*trap kicker valve*) conferisce allo scovolo la spinta idraulica necessaria per scorrere nella condotta.

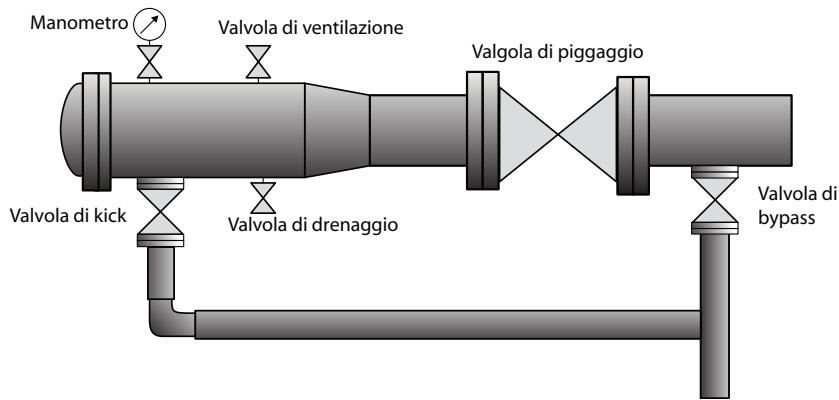


Figura 4.11: Configurazione base di una trappola di lancio (Davidson 2002).

Le trappole di ricezione differiscono non di molto dai sistemi di lancio. La differenza sostanziale risiede nella lunghezza della trappola e la collocazione degli indicatori di posizione, necessari in entrambi i dispositivi per verificare l'avvenuto lancio o ricezione degli scovoli.

4.3.1 Esempi di configurazione di sistemi di piggaggio

Le trappole di lancio e di ricezione possono apparire simili nella configurazione, ma sul campo sono nettamente diversi per la variazione di geometria richiesta per le due applicazioni. I sistemi di piggaggio sono progettati per

adattarsi alle specifiche della condotta e per svolgere diverse operazioni nel tempo. I sistemi di lancio/ricezione possono essere pensati in numerosi modi:

- **lancio verticale** (Figura 4.12a): lancio di scovoli in posizione verticale, possibilità di automatizzare il processo;
- **lancio standard del pig** (Figura 4.12b): è possibile il lancio di un solo pig alla volta;
- **lancio doppio o duale** (Figura 4.12c): combinazione di due trappole in parallelo su due condotte diverse, ma racchiuse in un unico sistema. Sistemi di questo tipo sono utilizzati dove si richiede il minore ingombro possibile, come in ambito *off-shore*;
- **sistema di batch automatico** (Figura 4.12d): sistema automatizzato di lancio di treni di *slug* interfacciati da degli scovoli di separazione;
- **lancio inclinato** (Figura 4.12e): principio simile alle trappole verticali, la maggiore distanza di lancio consente un maggiore controllo dello scovolo in immissione;
- **lancio combinato pig/sfera** (Figura 4.12f): per esempio, nello spiazzamento dell’acqua tramite sfere e la deidratazione tramite scovoli a schiuma;
- **sistemi di piggaggio automatico** (Figura 4.12g): sistemi totalmente automatizzati, capaci di inviare da remoto diversi tipi di scovolo (sfere, scovoli, etc.). Agli alti costi iniziali e operativi fa fronte l’alta efficienza delle applicazioni;
- **sistemi di lancio per pig di ispezione in linea** (Figura 4.12h): simili alle trappole convenzionali ma con camere di recupero molto più lunghe, per via delle dimensioni dello scovolo di ispezione interna.



(a) Trappola di lancio verticale.



(b) Trappola di lancio standard.



(c) Trappola di lancio duale.

(d) Sistema di *batching* in automatico.

(e) Trappola di lancio inclinata.



(f) Trappola per il lancio combinato scovolo/sfere.



(g) Sistema di piggaggio automatico.



(h) Trappola di lancio per ispezione in linea.

Figura 4.12: Diverse tipologie di trappole di lancio (T.D. Williamson, Inc. 2015).

4.4 Mezzo di spinta del piggaggio

In linea di massima si preferisce sospingere lo scovolo tramite un fluido incomprimibile. I liquidi incomprimibili consentono un maggiore controllo della velocità del pig e minore usura delle guarnizioni, ottimizzando quindi l'efficacia e la tenuta idraulica dello strumento. Liquidi come acqua, olio o prodotti chimici e di processo possono essere utilizzati come mezzi di spinta. Gli organi di tenuta idraulica devono essere idonei con l'utilizzo di tale mezzo liquido. I gas, essendo comprimibili, acquistano notevole energia in forma di pressioni prima che lo scovolo cominci a scorrere lungo la condotta. L'impiego di mezzi gassosi deve tenere conto di questi aumenti di pressione in condotta. Un apporto non sufficiente di gas, quindi una pressione non adeguata a monte dello scovolo, può generare un movimento del dispositivo a scatti (*stop-start motion*). L'effetto può essere attenuato con il giusto dimensionamento e mantenendo la contropressione a monte costante al fine di mantenere la velocità dello scovolo costante. Quando si impiegano dei gas come mezzi di spinta, è importante ricordare un possibile aumento dell'usura degli organi di tenuta. Quando il mezzo di spinta consiste in un fluido multifase, si devono tenere in considerazione gli aspetti legati ai mezzi comprimibili e incomprimibili. L'impiego di più fasi possono generare flussi a *slug* e le condotte, così come le trappole, devono essere progettate per questa applicazione (e.g. installazione di *slug catcher* in prossimità della trappola di ricezione).

4.5 Progettazione del sistema di condotte per il piggaggio

Il sistema deve essere progettato in modo tale da evitare imprevisti nelle operazioni di piggaggio. Di conseguenza ci sono degli importanti elementi di design da tenere in considerazione.

4.5.1 Lunghezza del cammino del pig

La distanza tra le varie trappole dislocate su una linea è determinata dalla lunghezza della condotta e dalla possibilità di installazione degli organi di lancio e di ricezione. La distanza massima percorribile da uno scovolo dipende dal tipo di mezzo di spinta dello scovolo:

- 160 km per linee a gas;
- 240 km per linee di produzione (multifase);
- 320 km per linee a olio.

Le distanze massime percorribili dallo scovolo sono riferite non allo spostamento fisico, bensì al percorso massimo con livelli minimi di efficacia del piggaggio. Come già detto in precedenza le linee a gas sono molto più abrasive e tendono a consumare più velocemente gli organi di tenuta. Le linee a olio offrono una lubrificazione naturale del dispositivo, garantendo una distanza doppia rispetto a quelle a gas.

4.5.2 Raggio di curvatura

Ogni scovolo è progettato per attraversare determinati raggi di curvatura minimi della condotta. Assieme al raggio di curvatura si fa riferimento all'angolo di curvatura, riferito al cambio di direzione della linea. In questo ambito i raggi di curvatura sono espressi in R/D , rapporto tra il raggio di curvatura e il diametro nominale della condotta. Solitamente si fa riferimento a 1,5 R/D per condotte a gas, 3 R/D per condotte a olio e 1 R/D per piccole condotte di raffineria.

4.5.3 Tipologia di valvole presenti

Le valvole a sfera moderne, o rubinetti sferici, garantiscono il passaggio degli scovoli lungo la linea. In presenza però di rubinetti sferici di vecchia generazione, quindi non progettati per il piggaggio della condotta, può accadere

il blocco del dispositivo (Figura 4.13a). Al fine di prevenire il blocco deve essere tenuta in stretta considerazione la dimensione della sede della valvola in rapporto alla lunghezza dello scovolo.

In presenza di valvole di ritegno, lo scovolo deve essere abbastanza grande da oltrepassare la valvola e mantenerla completamente aperta. Scovoli e sfere troppo piccole possono permanere nella sede della valvola, mantenendola aperta e bypassando di fatto il dispositivo (Figura 4.13b).

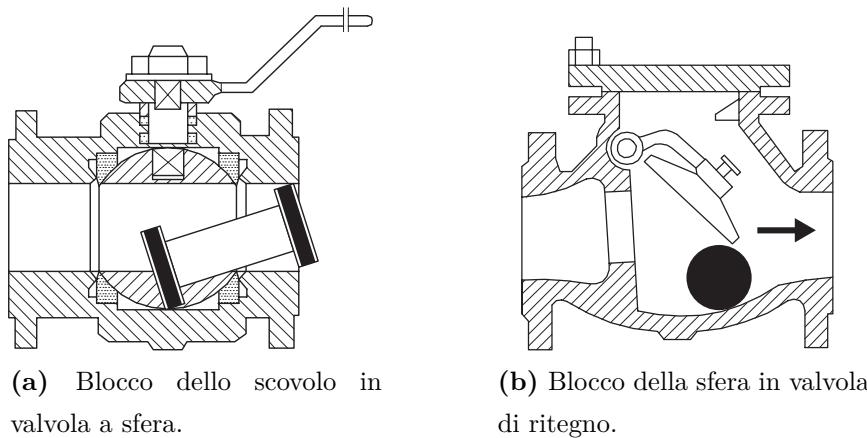


Figura 4.13: Blocco degli scovoli in corrispondenza di valvole (Guadagni 2003).

4.5.4 Indicatori di passaggio del pig

Gli indicatori di passaggio dello scovolo sono utilizzati per rilevare l'attraversamento del pig per un determinato punto della condotta, oppure per verificare l'avvenuto lancio o ricezione. Gli indicatori sono importanti nei sistemi automatizzati di piggaggio poiché sono collegati alle valvole e alle stazioni di pompaggio, le quali si attivano una volta giunto lo scovolo in posizione.



(a) Indicatore di posizione a bandierina.



(b) Indicatori di posizione elettronici a bandierina.



(c) Indicatore di posizione magnetico.

Figura 4.14: Indicatori di posizione dello scovolo in condotta (T.D. Williamson, Inc. 2015).

4.5.5 Altri dettagli progettuali

I raccordi a T (*tee*), la cui condotta di ingresso supera la metà del diametro della condotta principale, richiedono l'installazione di guide, al fine di prevenire il bloccaggio dello scovolo. Le guide possono essere di varia natura, come *coupon* o *tee barred*. Inoltre si evitano l'installazione di raccordi a T adiacenti l'un l'altro.

Le condotte laterali possono essere installate, lo scovolo in questo caso deve avere lunghezza superiore alla sede di immissione della condotta.

Variazioni drastiche del diametro interno vanno evitate. Lo scovolo deve essere adatto alle variazioni di dimensione interna e deve garantire la tenuta in tutte le sezioni interessate dal piggaggio. La stessa considerazione deve essere effettuata per linee costituite da condotte con diametro nominale diverso.

4.6 Bloccaggio dello scovolo

Il piggaggio presenta in generale determinati rischi: a prescindere dalle precauzioni prese, esiste sempre una minima probabilità che questo evento accada. Il blocco dello scovolo in condotta (*stuck pig*) può creare ostruzione completa (*full stuck pig*) interrompendo la produzione e causando notevoli danni. La chiusura può essere parziale (scovolo in *bypass*): le conseguenze non sono immediate e occorre in ogni modo rimuovere il dispositivo incastonato in condotta.

La condizione di *stuck pig* è caratterizzata da bassa frequenza dell'evento, cause difficilmente identificabili e al peggioramento delle condizioni iniziali in caso di una soluzione non idonea.

In caso di blocco dello scovolo si devono limitare azioni impulsive, individuare la soluzione finale certa per la risoluzione del problema, pianificare diversi tentativi per comprendere la soluzione migliore in termine di tempi e costi.

4.6.1 Soluzioni

Ogni possibile soluzione da adottare richiede delle condizioni al contorno da soddisfare, delle precise procedure e sequenze operative da seguire e degli effetti, cioè le conseguenze che l'applicazione può apportare. Le soluzioni possono essere classificate in:

- **preliminari:** verifica della situazione e dello stato del problema;
- **di tentativo:** la soluzione può risolvere o meno il blocco;
- **di localizzazione:** per comprendere la posizione dello scovolo, a volte possono portare allo sblocco non programmato;
- **meccaniche:** interventi meccanici puntuali sulla tubazione o su un tratto più o meno esteso;
- **ausiliarie:** tentativo di mitigazione del problema (e.g. passaggio dalla condizione di *full stuck pig* a quella di scovolo in *bypass*).

4.6.2 Fasi operative

Il primo step per l'analisi della procedura di sblocco più idonea prevede la raccolta dei dati inerenti le condizioni di impianto, le caratteristiche del fluido e dello scovolo. Conoscendo le condizioni al contorno iniziali si scartano le soluzioni non applicabili nel determinato contesto.

Il secondo step consiste nella valutazione delle diverse soluzioni possibili, valutando quella che minimizza tempi e costi. Questa soluzione di riferimento sarà l'elemento base per l'elaborazione delle alternative possibili. È importante comprendere le probabilità di insuccesso e gli effetti negativi associati alla soluzione di riferimento, utile alla formulazione di una stima dei tempi e costi della procedura di sblocco.

Dalla soluzione di riferimento si esaminano tutte le soluzioni di tentativo che possano aumentare la probabilità di riuscita della procedura. Alcune soluzioni di tentativo possono portare all'effetto opposto, sancendo l'inapplicabilità

della soluzione di riferimento.

Una volta prese in considerazione le soluzioni di tentativo e quella di riferimento, si studiano nel complesso le varie combinazioni in sequenza temporale e si comprende quale successione possa avere più probabilità di successo. Le sequenze di soluzioni con un costo complessivo medio-basso rispetto alla soluzione di riferimento sono considerate valide alternative a quella principale.

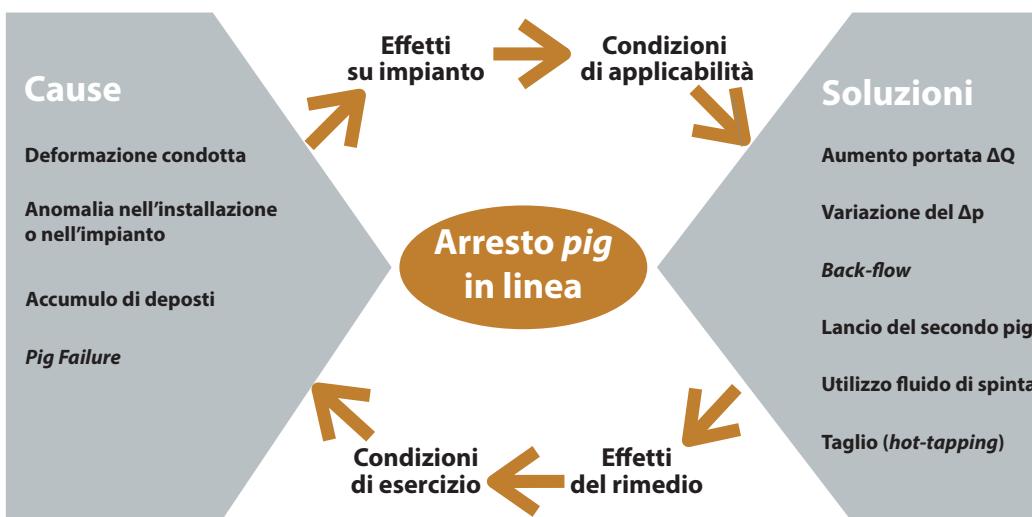


Figura 4.15: Possibili cause e soluzioni legate all'arresto di pig in linea (Lulio et al. 2006).

Il piggaggio come soluzione di ripristino delle condizioni ottimali in condotta necessita di numerosi accorgimenti e la condotta deve essere predisposta allo scorrimento dello scovolo al suo interno. Il blocco dello scovolo in linea può portare a conseguenze importanti sull'impianto, oltre che all'interruzione della produzione. Molte volte la condotta non è piggabile a causa della configurazione della linea o alla bassa resistenza alle sollecitazioni meccaniche che l'applicazione può comportare. Una valida alternativa nell'ambito dello spiazzamento di liquidi in condotte a gas è rappresentata dall'impiego di tensioattivi in orizzontale: l'applicazione, seppur di recente realizzazione, sembra avere un'ottima efficacia ovviando ai problemi legati al piggaggio in linea.

Capitolo 5

Linea di produzione di Verdicchio: tensioattivi per lo spiazzamento dell'acqua in condotta

Nei capitoli precedenti si sono messe in evidenza le caratteristiche principale della produzione di gas naturale. La risorsa prodotta è sempre associata ad altre sostanze, prima su tutte l'acqua, in fase liquido o gassosa. Nel caso in cui la fase liquida sia consistente, il moto nel *tubing* diventa bifase e occorre affrontare l'analisi tramite modelli di moto più complessi. L'acqua di produzione può determinare una riduzione di prestazioni a causa dell'innalzamento del battente idrostatico a fondo pozzo, nel caso in cui il giacimento non abbia energia sufficiente per evitare l'accumulo. Diversi sono i metodi per combattere i fenomeni di *liquid loading*, uno fra tutti l'immissione di schiumogeno, al fine di ridurre la tensione superficiale del liquido. Il trattamento preliminare del gas naturale in area pozzo non permette il totale abbattimento dei liquidi associati e nel tempo possono depositarsi lungo la condotta, in particolare in corrispondenza di avvallamenti. L'innalzamento del livello idrostatico (*hold-up*) in corrispondenza delle concavità della linea

si traduce in una diminuzione della sezione della portata, con conseguente generazione di cadute di pressione. Un restringimento di sezione provoca anche una aumento della velocità locale del gas: il suo valore è massimo in corrispondenza dell'innesto dell'iterazione tra la fase liquida e quella gassosa, l'acqua acquisisce velocità propria e viene trascinata a valle. L'innalzamento del livello idrostatico locale è definito dalla condizione di equilibrio tra l'area della sezione libera e la velocità relativa del gas naturale. La linea di Verdichio, appartenente al polo produttivo di San Giorgio Mare (FM), rappresenta un chiaro esempio di come l'acqua possa influire sulle condizioni di moto in condotta, generando una contropressione di 10 bar circa tra monte e valle (Figura 5.1).

Sulla base dei principi fisici relativi all'applicazione di schiumogeno per i

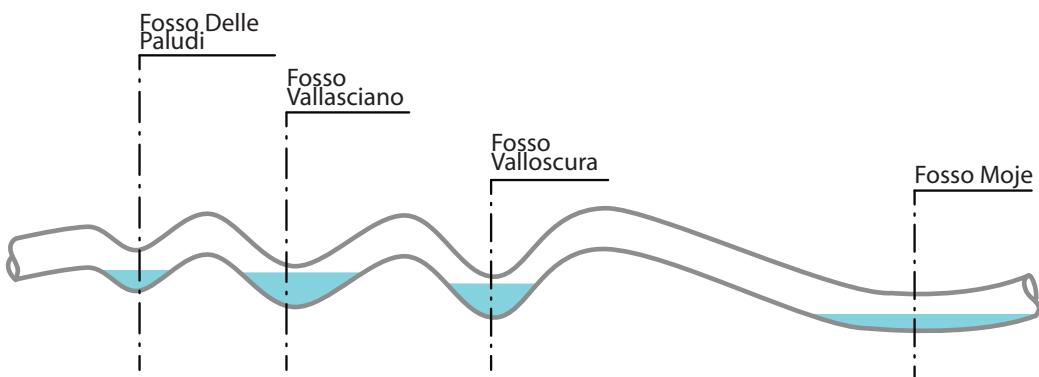


Figura 5.1: Rappresentazione schematica dell'acqua localizzata negli abbassamenti di quota della condotta.

pozzi a gas, da alcuni anni sta prendendo piede l'ipotesi di impiegare *foamer* in condotte orizzontali, in modo tale da diminuire la tensione superficiale dei liquidi presenti in condotta e favorire il trascinamento di quest'ultimi da parte della corrente gassosa. La Edison S.p.A., in collaborazione con Chimec S.p.A., ha testato nel giugno 2015 l'utilizzo di schiumogeno con l'obiettivo di attenuare il battente idrostatico dell'acqua accumulata in linea, in particolare in corrispondenza degli avvallamenti che, a causa dell'*'hold-up'*, limitano la produzione gas generando una elevata contropressione. L'analisi del metodo

si baserà sulla valutazione dell'azione dello schiumogeno in condotta e i risultati avuti nel breve-medio termine. Al fine di confermare i vantaggi legati all'applicazione, si fa riferimento all'ultimo piggaggio della linea Verdicchio effettuato nel luglio 2013. Per l'ottimizzazione della tecnica, viene infine fornito un profilo qualitativo delle condizioni ottimali per la buona riuscita dell'operazione.

Nel seguente lavoro si è deciso di trascurare il campo di San Lorenzo poiché la pressione di testa pozzo di SL-1B (circa 96 bar) è al di sopra della pressione critica, perciò qualsiasi variazione della pressione in condotta non influenza le condizioni di produzione del sito in questione¹. Anche il gas proveniente dalla centrale MAM è stato omesso dalla valutazione quantitativa e qualitativa, poiché immesso in linea tramite compressori.

5.1 Polo produttivo di San Giorgio Mare

Il polo produttivo di San Giorgio Mare è dislocato lungo il territorio della provincia di Fermo e prevede la produzione di gas naturale proveniente da più concessioni e il trattamento a specifica presso la centrale di San Giorgio Mare (centrale SGM). Gli impianti interessati rientrano nella Business Unit Asset Idrocarburi della Edison S.p.A. ed è gestito dal Distretto Operativo di Sambuceto (CH) che cura inoltre la Direzione di tutte le attività del Sistema di Gestione Integrato dell'Ambiente e della Sicurezza. Il polo produttivo di San Giorgio Mare comprende:

- pozzi relativi alle concessioni off-shore di Vongola Mare (VGM1), San Giorgio Mare (SGMC, SGM3, SGM6) e concessioni in-shore Verdicchio

¹La pressione critica rappresenta il valore per il quale vengono raggiunte le condizioni critiche di una corrente gassosa (Sabetta 2009). In questa fase la velocità del fluido è pari alla velocità del suono, velocità con cui una perturbazione si propaga in tale fluido. Se la pressione di monte è al di sopra della pressione critica mentre la pressione di valle è al di sotto, l'informazione di una eventuale variazione delle condizioni di valle (e.g. perturbazione dovuta a un restringimento e/o ostacolo) non è in grado di procedere verso monte.

(VRD-1), San Marco (SNM1-2-3), Cozza Terra (CZT-2D), Cassiano, Castellaro;

- linee di collegamento tra i pozzi e la centrale SGM;
- centrale SGM;
- vasche e serbatoi di raccolta acque e gasolina;
- punti di collegamento con le reti di distribuzione a carattere nazionale (Snam Rete Gas e SGI S.p.A.).

La centrale SGM riceve il gas proveniente dai pozzi e le piattaforme *off-shore* mediante una tubazione sottomarina (*sealine*) da $\phi 8"$ e $\phi 10"$ dal campo SGM. Una condotta sotterranea da $\phi 6"$ denominata "linea Verdicchio" raccoglie il gas proveniente dai campi *on-shore* e dalla centrale di Maria a Mare (MAM).

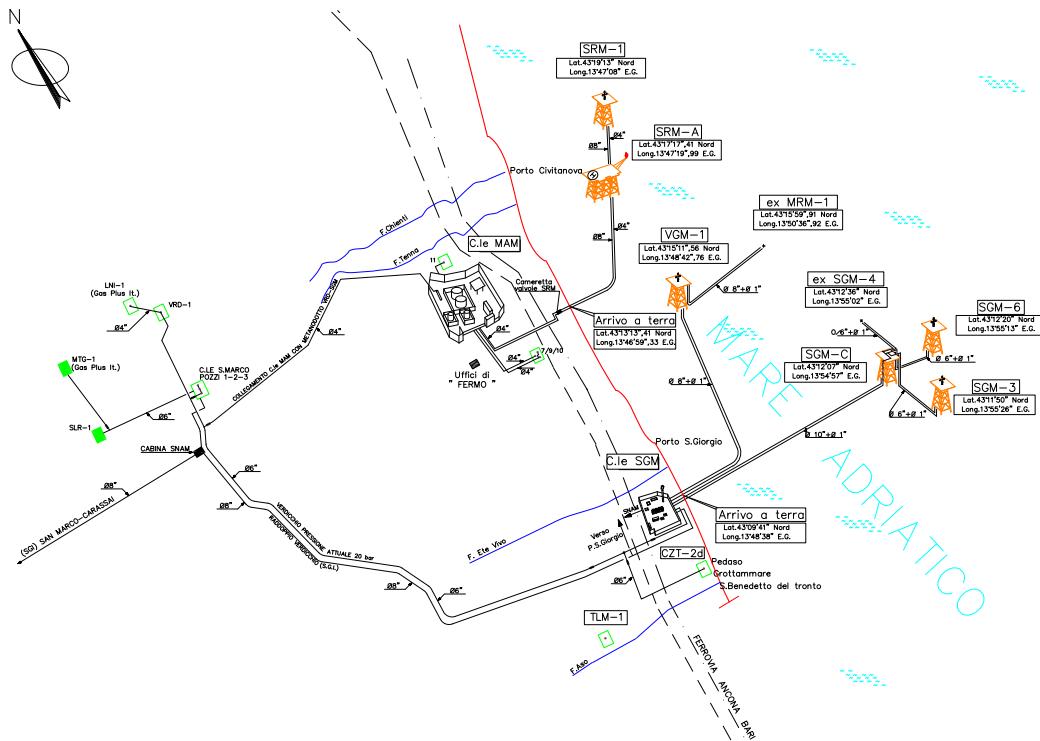


Figura 5.2: Planimetria delle installazioni on-shore e off-shore relative al polo produttivo di San Giorgio Mare.

5.1.1 La linea Verdicchio

La linea Verdicchio rappresenta la spina dorsale di tutta la produzione on-shore di gas naturale. La linea ha lunghezza complessiva di 13.600 metri circa e che raccoglie le produzioni dei campi di Verdicchio, San Marco, San Lorenzo e Cozza Terra, e la produzione dei campi Leoni e Monte Guzzo della società Gas Plus S.p.A., ora improduttivi. Nel 2013 la centrale MAM è stata collegata alla *flow line* di Verdicchio tramite una condotta da $\phi 4"$, convogliando il gas di coda proveniente dai campi olio Sarago Mare e Santa Maria a Mare. Il gas derivante da espansione viene inviato previa compressione.

Il territorio su cui è collocata la rete di distribuzione interna è di natura

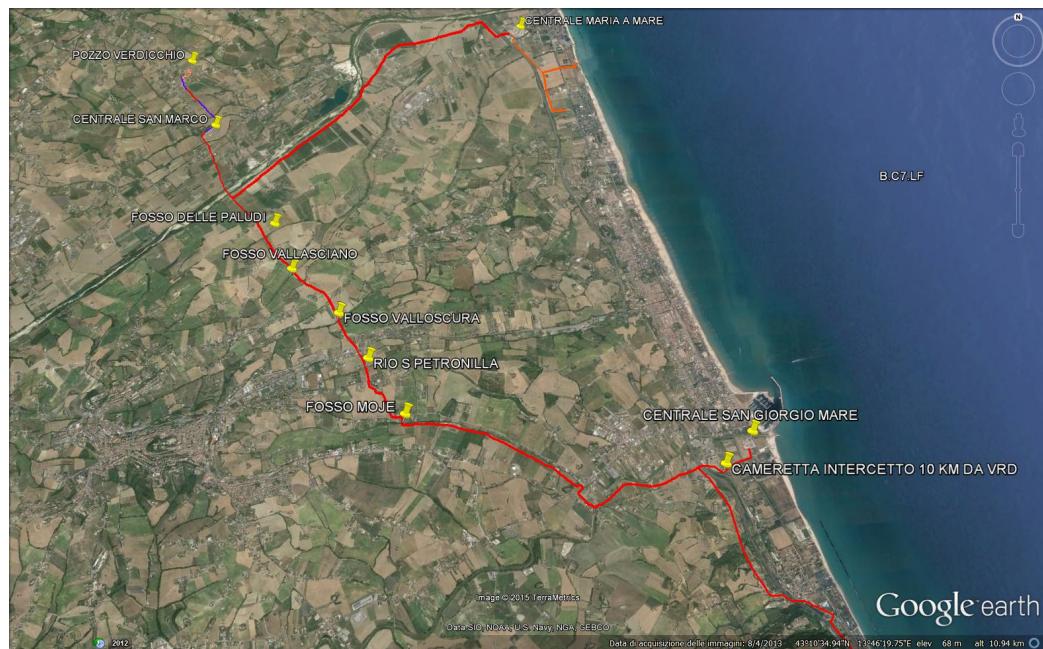


Figura 5.3: Aree pozzo e avvallamenti attraversati dalla linea Verdicchio.

collinare, di conseguenza il profilo della condotta è caratterizzato da variazioni di quota (Figura 5.4). La condotta parte dall'omonima area pozzo e passa attraverso l'area produttiva di San Marco. In questo punto la linea Verdicchio è collegata al polo di San Lorenzo, il quale immette il gas prodotto. Di seguito la condotta oltrepassa quattro diversi avvallamenti: Fosso

delle Paludi, Fosso Vallasciano, Fosso Valloscura e Fosso Moje, con variazioni di quota fino a 80 metri e una pendenza che raggiunge il 15%. Poco prima dell'arrivo in centrale, un raccordo proveniente da Sud permette l'immissione del gas proveniente da Cozza, la cui produzione però è attualmente ferma.

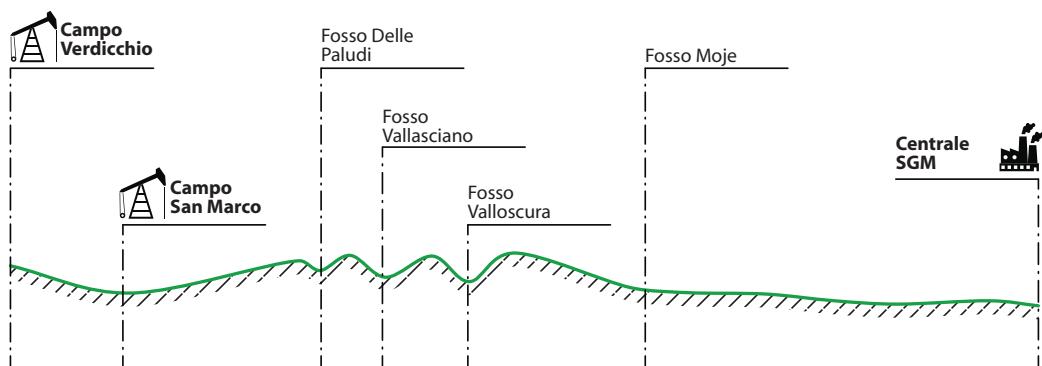


Figura 5.4: Variazioni di quota lungo la linea Verdicchio.

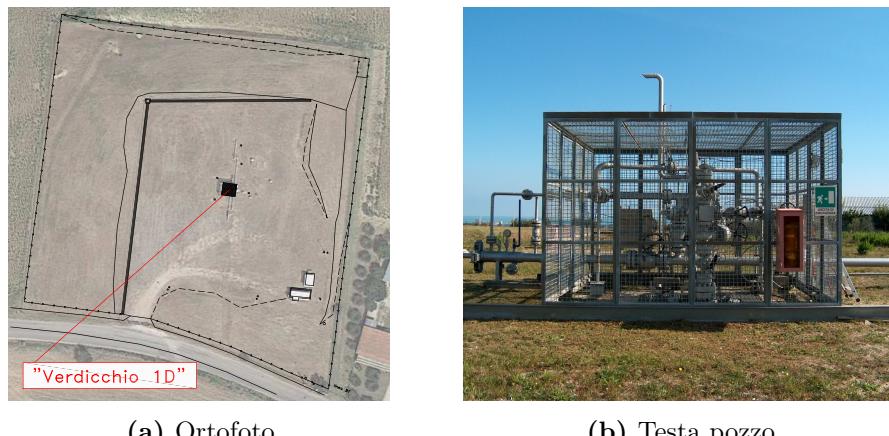
5.1.2 Campo Verdicchio

Il campo è costituito dal solo pozzo VRD-1 e il gas prodotto viene trasferito, senza alcun trattamento tramite una condotta da $\varnothing 6"$ alla centrale San Giorgio Mare poiché non vi è produzione d'acqua.

Sull'area sono presenti cabina elettrica, serbatoio aria compressa per la strumentazione collegato al compressore di alimentazione e trappola di lancio pig di pulizia della linea Verdicchio dall'area pozzo omonima alla centrale SGM. Il piazzale è recintato e nella recinzione esiste la seconda uscita di sicurezza, il pozzo ha la gabbia di testa con doppia apertura ed è dotata di scarico a terra.

5.1.3 Campo San Marco

Il campo è costituito da tre pozzi: SNM-1 (a 2 stringhe), SNM-2 (a 4 stringhe, di cui 2 attualmente ferme) e SNM-3 (a 2 stringhe). In origine il gas in



(a) Ortofoto.

(b) Testa pozzo.

Figura 5.5: Area pozzo di Verdicchio.

uscita dai separatori veniva riscaldato, ridotto di pressione, misurato. Con la diminuzione fisiologica dell'energia di giacimento, quindi delle pressioni, il gas in uscita dai separatori non necessita di disidratazione spinta e viene inviato direttamente alla linea di Verdicchio per il trattamento definitivo alla centrale SGM.

L'area operativa di San Marco ha la struttura di una centrale costituita da strutture di servizio (dove si svolgono le operazioni di gestione e coordinamento dal campo e dove sono registrate le misure fiscali e non del gas in uscita), officina meccanica e strumentale, magazzino, apparati di distribuzione dell'energia elettrica (cabina elettrica, inverter con batterie e quadri di distribuzione delle utenze) e l'impianto di trattamento, il quale è parzialmente in quiescenza.

Le acque di strato prodotte dalla coltivazione dei pozzi vengono raccolte in delle vasche. Queste acque sono poi periodicamente caricate, trasportate e immesse nei pozzi iniettori MAT-11 e MAT-7 della centrale di Maria a Mare (MAM).



(a) Ortofoto.

(b) Testa pozzo SNM-1.

Figura 5.6: Area pozzo di San Marco.

5.1.4 La centrale di San Giorgio Mare

La centrale SGM si trova nel cuore del polo produttivo di San Giorgio Mare, nella Località Marina Palmense (FM), a circa 300 m di distanza dalla costa e 200 m dall'autostrada A14. L'area complessiva interessata è di circa 30.000 m², di cui 300 m² dedicata agli uffici e alla sala controllo. Le principali attività svolte dal polo produttivo di San Giorgio Mare sono:

- produzione di gas dal giacimento;
- separazione dell'acqua e gasolina associate al gas naturale;
- stoccaggio e spedizione dell'acqua di strato;
- compressione del gas naturale;
- disidratazione del gas naturale;
- vendita del gas naturale, previa misura fiscale.

Separatori

I separatori S-101, S-111, S-112 sono separatori orizzontali, S-101 e S-111 sono separatori bifase mentre S-112 è un separatore trifase, dedicato al gas a



Figura 5.7: Vista dall'alto della centrale di San Giorgio Mare.

condensati proveniente dai campi off-shore di San Giorgio Mare. La geometria dei separatori è diversa e va da un volume minimo di 2.100 litri (S-101) a un massimo di 10.500 litri (S-111). L'acqua di strato viene inviata tramite autobotti alla centrale MAM e pompata nei pozzi di reiniezione. La gasolina proveniente dal solo separatore S-112 è inviata all'impianto di trattamento dedicato. La regolazione dei rispettivi livelli avviene tramite valvole di controllo livello (LCV, *Level Control Valve*), mentre la pressione dei separatori è regolata tramite la valvola di controllo della pressione (PCV, *Pressure Control Valve*).



Figura 5.8: Separatori a monte di tutto il trattamento gas.

Compressione

L'impianto di compressione è costituito da:

- **compressore** (K-101 e K-201): motocompressori alternativi (monostadio a doppio effetto) della Nuovo Pignone. I cilindri sono lubrificati e il raffreddamento è ad acqua. Ogni compressore lavora con un rapporto di compressione di 1:3 e sono configurati in serie in modo tale da portare la pressione da 5 bar a 45 bar; (step intermedio a 15 bar);
- **motore compressore**: motore Waukesha (General Electric) endodermico a ciclo Otto alimentato a gas, cilindrata totale da 115.400 cm³. La potenza della macchina è di 1547 BHP (*British Horse Power*, cavallo vapore britannico) a 1200 RPM (*Revolutions Per Minute*, giri al minuto);
- **aerorefrigerante** (A-101 e A-201): impianto di raffreddamento ad aria della Nuovo Pignone che raffredda il gas una volta compresso. L'aerorefrigerante è costituito oltre che dalla sezione di refrigerazione del gas di processo anche da due sezioni ausiliarie per la refrigerazione delle acque.



Figura 5.9: Vista da Sud dell'impianto di compressione: in verde gli stabili ospitanti i compressori, in bianco gli impianti di raffreddamento ad aria.

Unità di condensazione a bassa temperatura

La disidratazione e degasolinaggio avviene a opera di un'unità di condensazione a bassa temperatura. L'impianto è del tutto equivalente a un LTS convenzionale, nel quale però uno scambiatore gas-freon associato a unità frigorifera svolge gran parte dell'azione refrigerante, dato che le pressioni in ingresso in centrale non sono sufficienti a garantire un adeguato raffreddamento per espansione. L'unità di condensazione è costituita da:

- **scambiatore gas/gas:** costituito da due cilindri da 16" di diametro e 24 ft di lunghezza in serie, superficie di scambio totale di 162 m². Il gas viene pre-raffreddato tramite scambio termico con il gas freddo in uscita dall'unità, il quale viene a sua volta riscaldato in uscita dall'unità di condensazione;
- **valvola di iniezione glicol:** è collocata all'ingresso dell'unità, utile a inibire la formazione di idrati se la temperatura scende al di sotto del punto di formazione;
- **scambiatore gas-freon:** l'evaporatore o *chiller*, accoppiato con un'unità frigorifero, permette il raggiungimento della temperatura finale di -15°C²;
- **trappola di idrati:** placca forata verticalmente posta in verticale nel separatore;
- **separatore orizzontale a bassa temperatura:** separatore a freddo bifasico di 26" di diametro, l'evacuazione del liquido è controllata da una valvola di regolazione livello (*level control valve*, LCV).

²La temperatura è calcolata sul diagramma di fase: per una pressione di 45 bar (pressione in uscita dall'unità di compressione), il punto di rugiada si trova a -5°C



Figura 5.10: Separatore a freddo LTS-2.

Circuito glicol

Il glicol dietilenco iniettato nell'unità LTS si carica dell'acqua contenuta nel gas umido. La rigenerazione del glicol viene effettuata nella colonna di distillazione montata in cima al ribollitore.

Il glicol idratato penetra nel ribollitore dall'alto della colonna di distillazione, cola lungo la guarnizione in direzione opposta al vapore acqueo. Il dispositivo di riscaldamento è costituito da una camera di combustione a forma di U contenente un bruciatore. La temperatura della soluzione glicolata viene controllata da un controllore di temperatura. Il punto di consegna viene fissato dalla riconcentrazione desiderata della soluzione glicolata (120°C). Il glicol riconcentrato cola lungo il troppo pieno nel serbatoio di stoccaggio e viene ripreso da una delle pompe di circolazione a scelta. Il livello di glicol nel serbatoio viene controllato da un regolatore di livello. Tale controllore agisce attraverso la valvola a tre vie montata a valle della pompa di circolazione di servizio per mezzo di rubinetterie a punteruolo che devono essere posizionate correttamente. In tal modo, la portata messa in circolo è funzione del consumo richiesto per l'iniezione di glicol nell'unità.

Oltre al circuito glicol, la centrale è dotata di sistema metanolo, impiega-

to per lo scongelamento puntuale idrati che si possono generare lungo tutto l'impianto.

Riscaldatori

L'unità di riscaldamento è costituita da scaldatori (*heater*, Figura 5.11) indiretti a bagno d'acqua. La loro potenza è di 780.000 kcal/h (3 MBTU/h) e permette di elevare a 15°C, temperatura richiesta per l'immissione nella rete nazionale, una portata massima di gas di 46.000 m³/h.

Lo scopo principale del riscaldamento è quello di portare il gas alla temperatura minima richiesta per la sua distribuzione (dettato quindi dalle specifiche), il riscaldamento dei liquidi condensati nell'unità LTS e la rigenerazione del glicole nella colonna di distillazione.

Come fonte combustibile viene impiegato del *fuel gas*, il quale viene consumato nella camera di combustione immersa nella parte inferiore del bagno d'acqua. La regolazione della temperatura avviene tramite delle valvole di regolazione termica (*temperature control valve*, TCV) che inviano più o meno gas ai due bruciatori in funzione della temperatura del gas in uscita e della consegna fissata.



Figura 5.11: Scaldatore indiretto a bagno d'acqua.

Filtri

Il gas dopo il riscaldamento viene filtrato tramite due filtri a cartucce Ca-stagnetti 311 collocati in parallelo. I filtri sono installati al fine di abbattere ulteriori residui prima dell'immissione del prodotto in rete nazionale.

Rete elettrica

L'energia elettrica arriva in centrale alla tensione di 10 kV e viene convogliata al quadro a media tensione (QMT-1), previsto per una tensione nominale di 10/20 kV, 50 Hz in sistema trifase a neutro isolato. Il quadro è costituito da un arrivo e due partenze, da cui sono alimentati due trasformatori da 800 kVA, i quali convertono la tensione a 380 V. La corrente passa infine dai trasformatori al quadro a bassa tensione tramite cavo unipolare. Per l'alimentazione degli ausiliari è previsto un raddrizzatore con relativa batteria di accumulatori. L'impianto luce è collegato con un trasformatore a monte da 30 kVA che converte la tensione da 380 V a 220 V.

Rete aria

L'aria strumenti consente il controllo delle valvole dislocate in centrale tramite una rete pneumatica ad aria. La compressione dell'aria è a opera di due compressori a vite, a iniezione di olio, monostadio, raffreddato ad aria e azionato da motore elettrico tramite cinghia dentata.

Nella rete pneumatica l'aria viene aspirata tramite un filtro, passa nell'elemento compressore dove viene compressa. L'aria compressa e l'olio passano, tramite una valvola di ritegno, nel serbatoio aria/separatore olio, dove il lubrificante viene separato dalla miscela aria-olio. L'aria compressa viene scaricata attraverso un rubinetto di uscita dopo aver attraversato una valvola di alta pressione (PSH, *Pressure Safety High*), un refrigeratore dell'aria e uno scaricatore di condensa.

La pressione dell'aria forza l'olio dal serbatoio dell'aria, attraverso il refri-

geratore dell'olio, il filtro, il limatore e la valvola di arresto dell'olio, fino all'elemento compressore e ai punti di lubrificazione.

Strumentazione di misura e di conteggio presente sul campo

A monte di ogni separatore è installato un misuratore venturimetrico. Le misure istantanee di pressione differenziale, pressione e temperatura sono garantite dai trasmettitori elettronici al calcolatore (VESCOM 3V), il quale provvede ad effettuare il calcolo della portata e il conteggio fiscale. Misuratori venturimetrici associati ai calcolatori e/o registratori analogici (Triplex) sono presenti anche in ogni area produttiva collegata alla centrale di trattamento. La telelettura da remoto dei *flow computer* esterni alla centrale avviene attraverso un modem GSM esterno.

Il calcolo dei volumi d'acqua associati alla produzione di gas naturale è



Figura 5.12: Unità VESCOM 3V.

legato alla modalità di scarico dei liquidi nei separatori.

Sul campo di San Marco, ogni pozzo è dotato di separatore proprio e lo scarico in vasca avviene tramite interruttori di livello. Una volta raggiunto un determinato battente idrostatico, la valvola di scarico si attiva e l'acqua defluisce nelle vasche di stoccaggio. L'interruttore di livello è associato a un contatore, il quale registra il numero di attivazioni della valvola di scarico. L'acqua di produzione confluisce in un'unica vasca di stoccaggio e si verifica

giornalmente la quantità totale misurando l'innalzamento del livello. Il volume d'acqua calcolato viene così ripartito su ogni separatore in proporzione agli scatti giornalieri registrati dal contatore.

I separatori in centrale S101, S112 e S111 sono dotati invece di regolatori di livello, i quali mantengono costante il battente idrostatico all'interno della camera. In questo caso la misura dell'acqua prodotta avviene tramite lettura dell'innalzamento giornaliero dei serbatoi S113, S114 e S117 dedicati allo stoccaggio e smistamento dell'acqua di processo.



Figura 5.13: Serbatoio di stoccaggio acque S117.

5.2 Configurazione sperimentale: materiali e modalità di esecuzione

Il giorno venerdì 12 giugno 2015 è stato effettuato il test di campo nell'area produttiva di San Marco con la collaborazione della Chimec S.p.A.. Tra il 23 e il 27 febbraio 2015 c'è stata una precedente applicazione di schiumogeno in campo, che ha però riguardato la deliquificazione del pozzo Cozza, attualmente fermo e attivato periodicamente una volta ristabilita la pressione

massima a testa pozzo.

5.2.1 Schiumogeno

Il prodotto Phoenix 6163 è uno schiumogeno prodotto dalla Chimec S.p.A.. Disciolto in acqua, fa diminuire notevolmente la tensione interfaciale che compete alla superficie di separazione fra la soluzione diluita così ottenuta e la fase gassosa. Dal punto di vista chimico lo schiumogeno consiste in una miscela di alchilpoliglicoletere, surfactante non ionico, in alcol.

Lo schiumogeno ha effetto in soluzione acquosa con concentrazioni pari o superiori ai 5000 ppm. Il prodotto non comporta variazioni sostanziali ai parametri chimico-fisici dell'acqua di produzione, che può quindi essere convogliata ai pozzi iniettori senza trattamento preliminare.

Il *foamer* è distribuito e stoccato in contenitori IBC da 1000 litri.

5.2.2 Antischiuma

Il prodotto CHIMEC Phoenix 8161 è un antischiuma sempre prodotto dalla Chimec S.p.A.. È una miscela di derivati non ionici e surfactanti in soluzione acquosa. La sua azione consente di abbattere la schiuma all'interno dei separatori della centrale SGM.

Il *defoamer* agisce sulla soluzione schiumosa per concentrazioni pari o superiori ai 5000 ppm. L'uso del prodotto non preclude l'immissione delle acque di produzione nei pozzi iniettori senza eventuali trattamenti.

Anche il *defoamer* è distribuito e stoccato in contenitori IBC da 1000 litri.

5.2.3 Punto di iniezione

L'iniezione in batch e in continuo del *foamer* è attuata sulla linea di mandata del campo San Marco (Figura 5.14). Inizialmente l'iniezione in-batch è stata pensata in una linea ausiliaria appartenente all'impianto di trattamento in quiescenza di San Marco. L'ipotesi è rigettata poiché il *bypass* è collocato a

Tabella 5.1: Parametri fisico-chimici dello schiumogeno e dell'antischiumogeno presi dalle rispettive schede di sicurezza.

Parametri	CHIMEC Phoenix 6163	CHIMEC Phoenix 8161
Stato fisico a 20°C	Liquido	Liquido
Colore	Da trasparente a giallo chiaro	Da trasparente a opalescente
Punto di congelamento (°C)	n.d.	n.d.
Punto di ebollizione (°C)	c.a. 140	c.a. 100
Punto di scorrimento (°C)	n.d.	<0
Densità a 20°C (gr/cm³)	0,96±0,02	0,99±0,02
Viscosità a 20°C (cP)	<100	<100
Solubilità in acqua	Totalmente solubile	Parzialmente solubile
Mezzi solventi	Acqua	Acqua
pH in acqua distillata	(1%) c.a. 6,0	7,0±1,0
Punto di infiammabilità	c.a. 19	n.d.

troppa distanza dalla linea di mandata. Lunghe distanze all'interno dell'area possono tradursi in maggiori perdite di carico, inibendo in parte l'azione di "shock" provocata dal batch. Inoltre si è ritenuto che il tratto iniziale potesse essere stato interessato da acqua stagnante (il tratto è completamente orizzontale), condizione sfavorevole all'azione ottimale del *foamer*.

A monte della linea di mandata è presente una valvola a sfera e subito dopo l'apparato di misura composto da tubo venturimetrico e rilevatori di pressione assoluta e temperatura. L'unità è collegata sia al *flow computer* per il calcolo istantaneo, orario e giornaliero della portata di gas sia al registratore analogico Triplex. A valle del venturimetro si collocano delle valvole dedicate all'installazione di manometri di misura e di controllo e una PCV. Più avanti sono locate due valvole di sicurezza (*Pressure Safety Valve*, PSV) di scarico o *blow-down*, un'altra valvola di misura della pressione, un'altra valvola a sfera, una valvola di arresto di sicurezza (*Shut-Down Valve*, SDV) e due valvole rispettivamente di alta (*Pressure Safety High*, PSH) e bassa pressione

(Pressure Safety Low, PSL).

Per il batch di schiumogeno la linea di mandata è stata isolata tramite le valvole a sfera presenti. L'immissione di *foamer* è stata possibile tramite la rimozione temporanea dei dispositivi di lettura e controllo della pressione, in particolare dei manometri presenti a monte della PCV per l'applicazione in-batch e del manometro a monte della SDV, associata al quadro di controllo generale, per l'immissione in continuo.

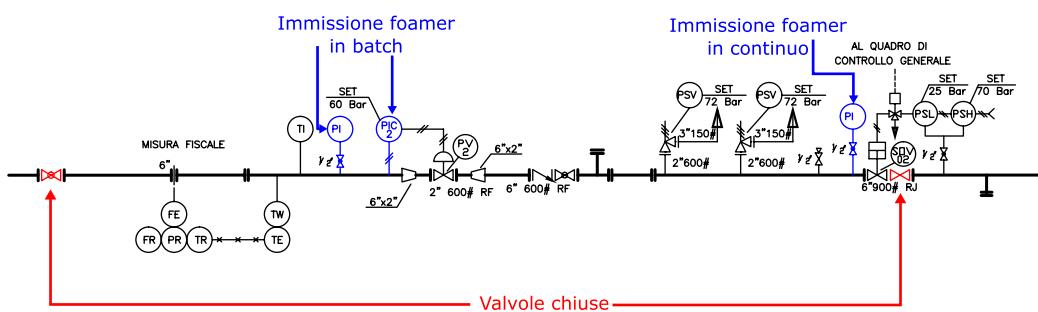


Figura 5.14: Layout linea di mandata SNM, modalità di applicazione del batch.

5.2.4 Iniezione in-batch

Scartata l'ipotesi della linea ausiliaria, si è deciso per il blocco temporaneo della produzione tramite iniezione in linea.

Per l'applicazione in-batch si è deciso di introdurre una quantità di schiumogeno che generasse uno shock consistente, in modo da attivarsi nell'immediato e favorire così l'applicazione dello schiumogeno in continuo.

Come volume d'acqua stimato \hat{V}_w all'interno in condotta è stato preso il valore dell'acqua spiazzata nell'ultimo piggaggio effettuato il 30 luglio 2013: lo scovolo per l'occasione spiazzò $14,5 \text{ m}^3$ di acqua dalla condotta.

Conoscendo la concentrazione $c_f = 5000 \text{ ppm}$ di attivazione dello schiumogeno, si è calcolata il volume minimo $V_{f,min}$ richiesto in condotta:

$$V_{f,min} = c_f \hat{V}_w = 0,0725 \text{ m}^3 = 72,51 \quad (5.2.1)$$

Non conoscendo perfettamente i volumi di acqua in condotta e non avendo mai applicato degli schiumogeni in orizzontale, il valore precedentemente calcolato è stato preso come semplice riferimento e si è optato in prima fase per un volume sovrastimato \hat{V}_f di 100 litri.

Nello studio preliminare si è scelto anche di introdurre dell'acqua assieme allo schiumogeno, al fine di diminuire la viscosità del prodotto (c.a. 100 cP) e velocizzare l'arrivo del batch al primo avallamento. La scelta di acqua come *chaser* deriva dall'applicazione di schiumogeni per pozzi orizzontali, in cui però si fa riferimento a un cuscino di *brine* dal peso specifico superiore all'acqua. La quantità di acqua stabilita è di 50 l circa, rispettando il rapporto 2:1 con il prodotto.

Per l'immissione di *foamer* sono state chiuse le due valvole a sfera manuali a monte e a valle della linea di mandata. Il tratto interessato è stato depressurizzato tramite l'apertura di una valvola di misura a valle delle PCV.

Nel frattempo sono stati preparati i volumi di schiumogeno e acqua precedentemente concordati. I liquidi sono stati raccolti e portati in linea tramite recipienti di 30 litri e 50 litri.

Una volta completata la depressurizzazione si è attuato il batch in linea (Figura 5.15a). Nella condotta sono stati introdotti 40 litri di acqua ma solamente 60 litri di schiumogeno: il prodotto infatti tracimava dal punto di iniezione ed è stato impossibile continuare l'applicazione.

Se si considera il diametro della condotta d di 6", cioè 15,24 cm, la capacità volumetrica per unità di lunghezza vol_u è data da:

$$vol_u = \frac{\pi}{4} d^4 = 17,66 \text{ l/m} \quad (5.2.2)$$

I liquidi totali V_l introdotti fino a quel momento erano di 100 l (60 l di schiumogeno e 40 l di acqua). Se si considera una condotta ideale senza variazioni geometriche, la lunghezza teorica l_{liquid} occupata dal fluido immesso è di:

$$l_{liquid} = \frac{V_l}{vol_u} = 5,7 \text{ m} \quad (5.2.3)$$

Nonostante la presenza di variazioni geometriche che possono diminuire la capienza della condotta, la lunghezza teorica calcolata non rispecchia affatto

il tratto collocato tra le due valvole a sfera, poste a più di 10 m di distanza. La causa è stata attribuita alla presenza della PCV (Figura 5.15b), la quale non ha permesso al fluido immesso di defluire anche al di là del restringimento su cui agisce la valvola.

Si è deciso quindi di chiudere e inviare il batch caricato, fermare nuovamente la produzione, depressurizzare e caricare nuovamente la linea con altro schiumogeno associato ad acqua. Sono stati quindi immessi in condotta altri 55 litri di schiumogeno assieme a 20 litri di acqua. La produzione è stata quindi ripristinata tramite l'apertura delle valvole di mandata a sfera.

In totale, sono stati immessi in condotta 115 litri di *foamer* e 60 l di acqua. L'operazione ha richiesto il blocco della produzione per circa un'ora.



(a) Immissione di schiumogeno tramite apertura della linea dedicata alla misurazione.



(b) Valvola Fisher, valvola regolatrice associata a un restringimento della condotta.

Figura 5.15: Applicazione di schiumogeno in-batch: immissione e dettaglio della PCV.

5.2.5 Iniezione in continuo

Lo schiumogeno è stato iniettato in continuo tramite una pompa volumetrica (Figura 5.16a). La potenza massima della pompa è di 8 litri orari; la portata

è stata impostata a 4 litri orari, sfruttando così il 50% della potenza massima della macchina.

Il batch di schiuma sarebbe potuto non essere necessario in presenza di una



(a) Pompa volumetrica installata nei pressi della cisterna IBC.



(b) Linea di collegamento tra la pompa e la mandata.

Figura 5.16: Immissione dello schiumogeno in continuo.

pompa a maggiore potenza. Maggiori dosaggi nell'intervallo di tempo avrebbe potuto garantire lo shock iniziale del sistema, quindi l'attivazione della soluzione acqua-schiumogeno nel primo avvallamento. (Figura 5.17). Una volta attivato il *foamer* nel primo avvallamento, una maggiore potenza della pompa avrebbe garantito concentrazioni sufficienti anche per l'acqua nel secondo avvallamento, che nel frattempo sarebbe entrata in soluzione con il primo cuscino d'acqua.

La pompa è stata avviata al termine delle operazioni di batch dello schiumogeno ed è rimasta attiva per 4 ore e 30 minuti, con un'iniezione totale di 18 litri di *foamer*.

5.2.6 Controllo della schiuma in centrale

Per l'iniezione di *defoamer* è stata impiegata una pompa esterna appositamente allestita per l'esecuzione del test. L'iniezione è avvenuta a sul sepa-

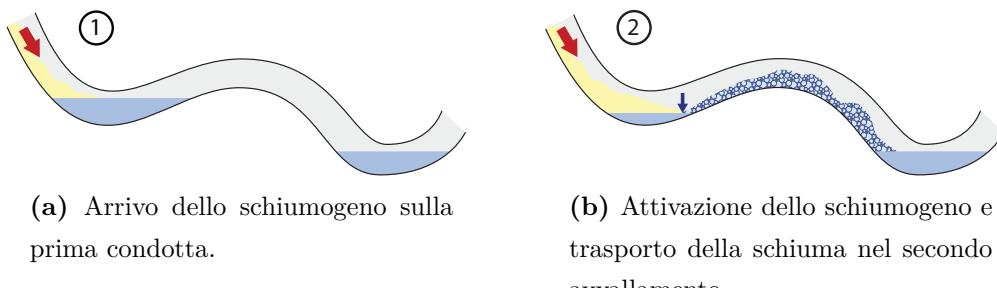


Figura 5.17: Principio di funzionamento dello schiumogeno in continuo. Al fine di mantenere una concentrazione minima di attivazione si applica un batch di *foamer* iniziale.

ratore S-101 tramite una valvola a monte della relativa PCV utilizzata in passato per l'immissione di prodotti chimici come anticorrosivi o biocidi.

La schiuma all'interno del separatore non può essere rilevata dalle valvole di alto livello. In caso di aumento incontrollato del battente idrostatico, la schiuma può oltrepassare il separatore e creare problemi di varia natura a tutto l'impianto, a cominciare dai compressori subito a valle.

La pompa dosatrice è stata attivata 30 minuti dopo l'inizio delle operazioni legate al batch di schiumogeno. La portata di immissione era di 30 litri orari. In totale sono stati iniettati 150 litri di antischiuma divisi in un primo batch di circa 25 litri per caricare il separatore e il resto in continuo a vari *rate* di iniezione regolati a seconda della qualità di schiuma in arrivo.

5.2.7 Apparati di misura

I parametri di pressione e temperatura sono stati monitorati tramite un termomanometro digitale installato sulla linea di mandata, tra la PCV e le valvole di *blow-down*, in corrispondenza dei due *spool flangiati*. Il supporto del termomanometro era inizialmente di 60 minuti. Una volta riscontrata la celerità dell'evento, il supporto è stato portato a un minuto a distanza di 5 ore dall'inizio della misurazione. La pressione assoluta, temperatura e portata sono state inoltre monitorate tramite la strumentazione di impianto

(VESCOM 3V), fornendo misure istantanee, e compilando rapporti orari e giornalieri.

5.3 Risultati e discussione

I principali risultati raggiunti sono i seguenti:

1. spiazzamento di 12,74 m³ di acqua in poco più di 2 ore;
2. pressione in linea ridotto da 15 bar a 5÷6 bar, con una diminuzione della contropressione in linea da 10 bar a 0,5 bar circa;
3. aumento della produzione complessiva del pozzo Verdicchio e del campo San Marco del 5% circa, da 17.800 Smc/g a 18.800 Smc/g;
4. regolarizzazione della produzione dei pozzi presenti a San Marco con stop dell'utilizzo del *foamer stick* precedentemente calato a giorni alterni nei *tubing* di produzione.

Dalle conoscenze tecniche del prodotto e dall'esperienza acquisita nel precedente pozzo Cozza, lo spiazzamento dell'acqua e i suoi relativi volumi sarebbero stati apprezzabili nell'ordine di decine di ore. Lo schiumogeno reagisce con l'acqua solo al raggiungimento della concentrazione di attivazione c_f di 5000 ppm, valore che l'acqua accumulata avrebbe dovuto raggiungere in tutti gli avvallamenti della condotta prima di defluire alla centrale SGM. In questo caso l'acqua non è confluita con portata costante, bensì lo spiazzamento si è realizzato in un unico cuscino fluido, seguito da una modesta portata nelle ore successive.

5.3.1 Studio degli effetti a breve termine

Dopo un'attesa di 2 ore e 10 minuti dall'applicazione del batch, sono confluiti in centrale circa 7 m³ (con una portata stimata di circa 80 m³/h) di acqua mista a schiuma (Figura 5.18) e residui solidi di colore scuro, associati all'attività di corrosione interna della condotta. L'arrivo improvviso dell'acqua ha



Figura 5.18: Arrivo di acqua in centrale mista a schiuma e polvere nera in soluzione.

portato al blocco centrale a causa della chiusura della valvola di alto livello del separatore S101. Il volume di 7 m³ deriva dall'acqua accumulata lungo la condotta. Una volta riattivata la produzione a pieno regime, l'afflusso d'acqua è continuato con quantitativi importanti per le successive 2 ore (circa 3 m³/h), per poi affievolirsi nell'ordine di decine di litri ora. Il livello della vasca di raccolta acque S117 si è innalzato durante il test di 65 cm, valore legato al volume di acqua confluita in centrale, pari a 12,74 m³. Il volume di acqua arrivato in centrale è più che allineato alla quantità di acqua spiazzata con il piggaggio della linea il 30 luglio 2013 (14,5 m³).

In realtà l'innalzamento della vasca è continuato anche durante la notte. Tuttavia al S117 confluisce anche l'acqua di produzione proveniente dal pozzo Vongola. Si è quindi scelto di applicare un *cut-off* nel momento in cui i trend di produzione dell'acqua sono tornati a valori consueti. Si considera quindi l'innalzamento del battente idrostatico a circa tre ore dall'arrivo in centrale. Nell'arco di tempo tra l'avvio della produzione dopo il batch e l'arrivo dell'acqua in centrale, la pressione in linea ha oscillato attorno a 14 bar. L'oscillazione è riconducibile alla presenza degli avvallamenti, i quali creano queste pulsazioni di pressione. Una volta confluito l'ingente volume d'acqua, dopo

9 ore dall'applicazione la pressione in linea è fortemente decresciuta e si è attestata a circa 6 bar.

La temperatura della linea misurata dal manometro digitale, una volta eseguito il batch in condotta e aperti nuovamente i pozzi, è scesa bruscamente dai 32°C ai 21°C circa, testimoniando così l'espansione del gas una volta riaperte le valvole. Durante il test non si riscontrano particolari episodi: la temperatura del termomanometro digitale ha successivamente seguito i trend di quella esterna, rimanendo più o meno costante durante le ore notturne e aumentando durante le ore diurne.

L'antischiuma o *defoamer* Phoenix 8161 ha agito correttamente. Al fine

Profilo parametri termomanometro e acqua in centrale

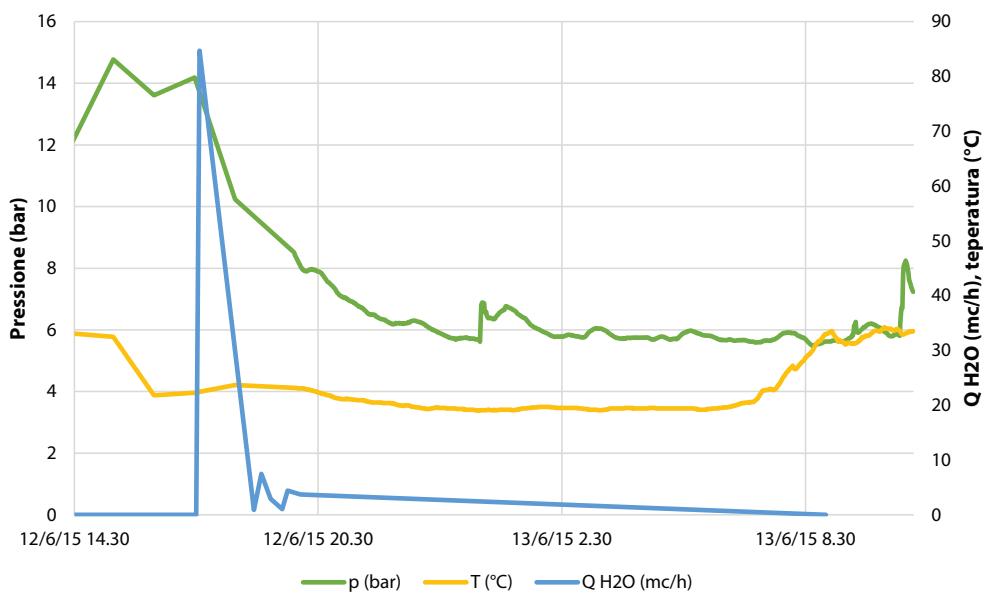


Figura 5.19: Variazione della pressione e temperatura misurato sulla manda di San Marco, in relazione alla portata d'acqua confluita presso la centrale SGM

di valutare qualitativamente l'azione dell'antischiuma è stata prelevata dell'acqua a monte e a valle del separatore (Figura 5.20). I campioni sono poi

stati agitati e lasciati riposare. Sebbene la schiuma si crei in entrambi i contenitori, il fluido a monte del separatore è contraddistinto da una schiuma stabile anche dopo diversi minuti, il fluido a valle invece tende a dissolvere la schiuma presente in superficie nel giro di pochi secondi.



Figura 5.20: Test visivo dell'efficacia dell'antischiuma, da sinistra a destra campioni prelevati rispettivamente a monte e a valle del separatore.

5.3.2 Andamento produttivo post-test

Al fine di valutare i vantaggi di tale applicazione, sono stati analizzati nelle settimane successive gli andamenti dei parametri di portata, pressione e acqua prodotta e del pozzo di Verdicchio e dei pozzi e della linea di mandata di San Marco.

Preso come riferimento il 12 giugno 2015, giorno in cui è stata effettuata l'operazione di spiazzamento, si considerano due intervalli temporali della durata di 97 giorni, prima e dopo l'applicazione. Gli scenari in questione vanno dal 7 marzo 2015 all'11 giugno 2015 e dal 12 giugno 2015 al 16 settembre 2015.

Per quanto riguarda i parametri di pressione, nei pozzi si fa riferimento alla pressione di testa pozzo (PTP o FTHP, *Flowing Tube Head Pressure*), mentre nella mandata il valore esprime la pressione in linea (*Flowing Line Pressure*, FLP).

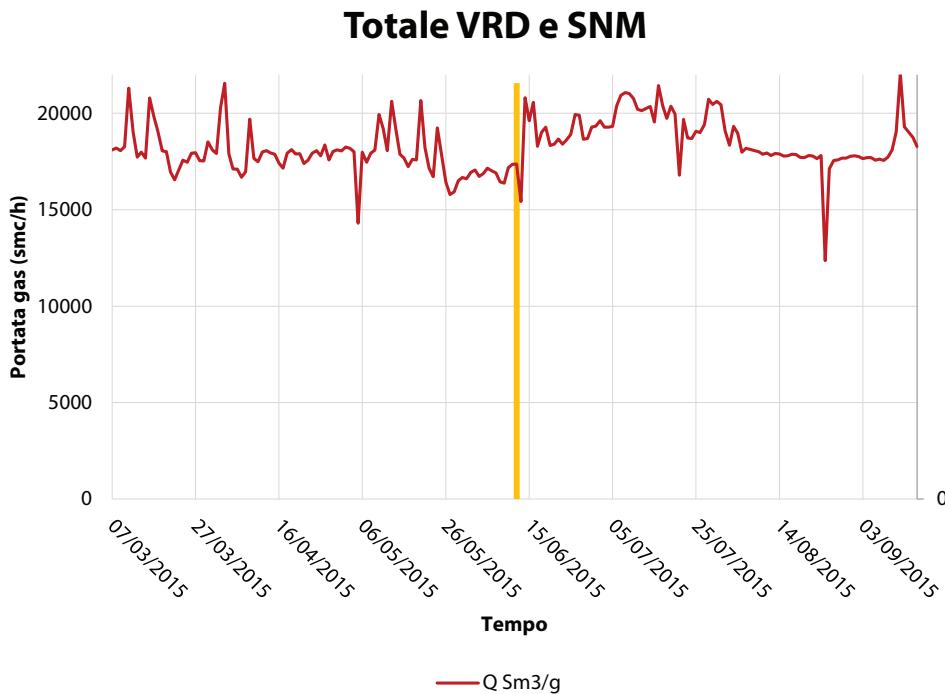
Gli andamenti dei parametri sono rappresentati tramite grafici, dove è possibile valutare i trend prima e dopo l'applicazione. L'analisi quantitativa dei dati relativi ai due scenari si basa sul calcolo di tre indici statistici:

- media aritmetica: $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$;
- deviazione standard: (della popolazione) $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$;
- coefficiente di variazione: $\sigma* = \frac{\sigma}{|\mu|}$

dove x_i sono variabili generiche e n il numero di variabili della serie generica. Si è scelto di calcolare il coefficiente di variazione, un indice statistico che permette di valutare la dispersione dei valori indipendentemente dal valore medio assoluto (è un indice adimensionale)

È importante sottolineare che dopo l'applicazione, in base ai risultati ottenuti e riportati qui di seguito, è iniziata una fase di ottimizzazione dei pozzi che si innestano a monte della PCV regolando il settaggio della valvola stessa. Immediatamente dopo lo spiazzamento della condotta la pressione della PCV è stata portata da 15 bar a 11 bar. In un secondo, il giorno 7 luglio 2015 la PCV è stata settata da 11 bar a 9 bar.

La Figura 5.21 mostra che, dopo l'applicazione, la portata di gas naturale della linea Verdicchio (come detto in precedenza, si trascurano i contributi di San Lorenzo e della Centrale MAM) è aumentata del 5,07%, a testimonianza del fatto che minori contropressioni conseguono migliori condizioni di produzione. L'acqua di produzione non viene mostrata poiché fa riferimento al solo campo di San Marco (Verdicchio è un pozzo anidro).



(a) Andamento di portata gas della linea Verdicchio (si omettono San Lorenzo e il gas proveniente dalla centrale MAM) dal 07/03/2015 al 16/09/2015.

	Indice stat.	PRE-TEST	POST-TEST	Δ	$\Delta\%$
Gas (Smc)	μ_{gas}	17852,34	18758,21	905,866	5,07%
	σ_{gas}	1148,53	1370,326	221,7964	19,31%
	σ_{gas*}	6,43%	7,31%	0,87%	13,55%

(b) Indici statistici della portata relativa alla linea Verdicchio (si omettono San Lorenzo e il gas proveniente dalla centrale MAM), periodi 07/03-11/06 e 12/06-16/09.

Figura 5.21: Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeno sulla linea Verdicchio, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.

5.3.3 Pozzo Verdicchio

La Figura 5.22 mostra gli andamenti di gas, acqua e pressione a testa pozzo del pozzo VRD-1.

Il test ha portato a una brusca diminuzione della pressione a testa pozzo, passando da 14 bar a 6,4 bar di media. La pressione di testa pozzo è allineata con quella della linea poiché la duse è totalmente aperta. La variazione del parametro rispecchia fedelmente il cambiamento delle condizioni della linea a valle.

La produzione di gas nel secondo periodo è più che raddoppiata, attestandosi a un aumento di portata del 151,45%. Dopo un primo momento di produzione importante, i valori sono tornati in linea a quelli precedenti alla produzione, ma l'andamento è molto più regolare, con variazioni nell'ordine di decine di Standard metri cubi di gas.

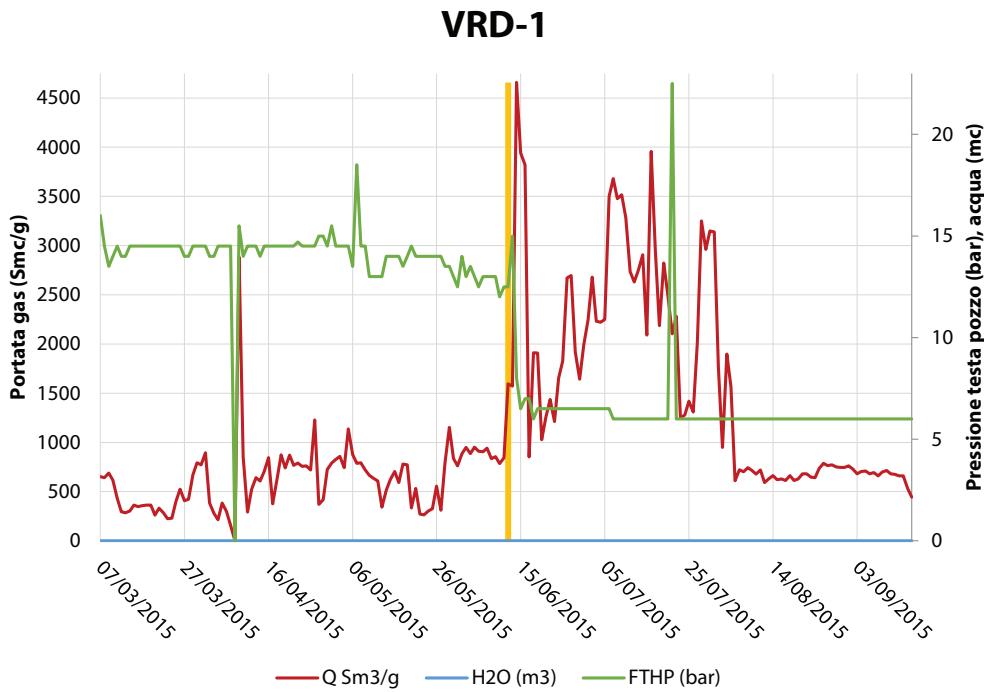
I dati di portata del pozzo Verdicchio sono affetti da forte incertezza poiché derivanti da operazioni di stima rispetto la portata totale presso la centrale SGM. Si può comunque affermare che l'applicazione di *foamer* ha decisamente migliorato le condizioni di produzione del pozzo Verdicchio.

5.3.4 Campo San Marco

La Figura 5.23 rappresenta gli andamenti di portata gas, acqua e pressione in linea del campo SNM sempre relativa all'intervallo di tempo a cavallo del test.

La contropressione si è abbassata notevolmente, infatti si è passati da una pressione in linea di circa 15 bar a una media di 5,5 bar (nell'ultimo periodo il valore si attesta a 5,2 bar). La dispersione dei valori di pressione è maggiore nel secondo periodo: l'effetto tende però a diminuire nel tempo, come visibile nella parte destra del grafico.

La produzione del gas non ha subito variazioni e la media è rimasta più o meno costante. Tuttavia la portata ha acquisito un andamento più lineare e costante, confermando dal decrescita del coefficiente di variazione rispetto al

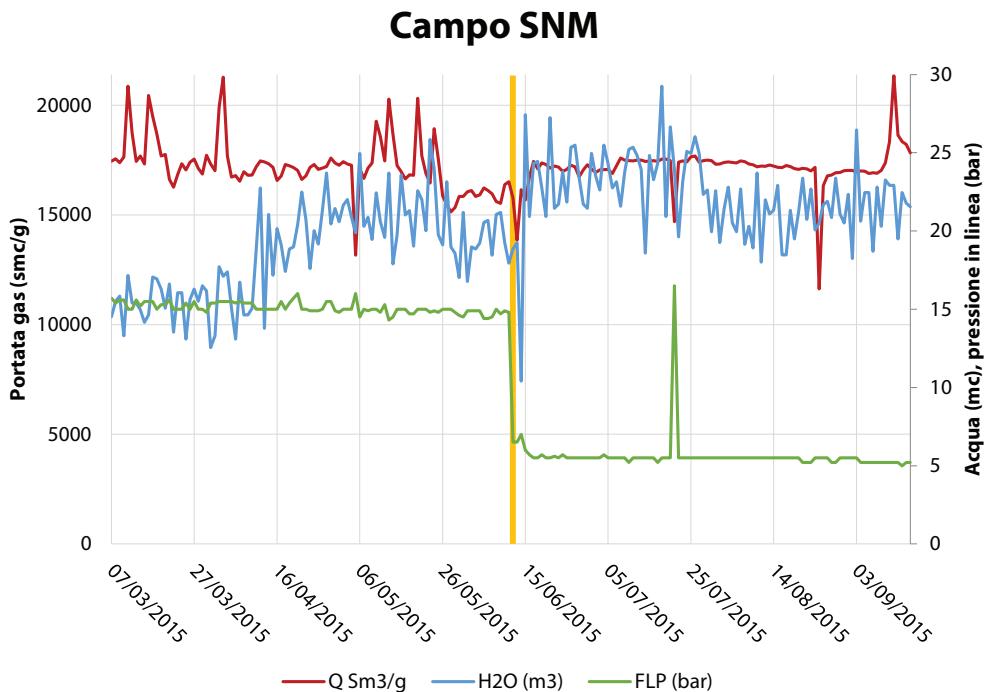


(a) Andamento di portata gas, acqua e PTP del pozzo Verdicchio dal 07/03/2015 al 16/09/2015.

	INDICE STAT.	PRE-TEST	POST-TEST	Δ	$\Delta\%$
FTHP (bar)	μ_p	13,99	6,41	-7,59	-54,21%
	σ_p	1,65047	1,91437	0,2639	15,99%
	σ_p^*	11,80%	29,88%	18,09%	153,33%
Gas (Smc)	μ_{gas}	638,622	1605,83	967,211	151,45%
	σ_{gas}	355,42	1066,1	710,678	199,95%
	σ_{gas}^*	55,65%	66,39%	10,73%	19,29%

(b) Indici statistici dei parametri relativi al pozzo Verdicchio, periodi 07/03-11/06 e 12/06-16/09.

Figura 5.22: Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeno sul pozzo Verdicchio, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.



(a) Andamento di portata gas, acqua e FLP del campo SNM dal 07/03/2015 al 16/09/2015.

	Indice stat.	PRE-TEST	POST-TEST	Δ	$\Delta\%$
FTHP (bar)	μ_p	15,00	5,59	-9,41	-62,74%
	σ_p	0,93306435	1,15093355	0,217869	23,35%
	σ_p^*	6,22%	20,59%	14,37%	231,02%
Gas (Smc)	μ_{gas}	17208,8061	17166,8229	-41,98321	-0,24%
	σ_{gas}	1232,24207	919,781553	-312,4605	-25,36%
	σ_{gas}^*	7,16%	5,36%	-1,80%	-25,17%
H_2O (m ³)	μ_{H2O}	18,55	22,26	3,71	20,01%
	σ_{H2O}	3,0137599	2,5760467	-0,44	-14,52%
	σ_{H2O}^*	16,25%	11,57%	-4,68%	-28,77%

(b) Indici statistici dei parametri relativi al campo SNM, periodi 07/03-11/06 e 12/06-16/09.

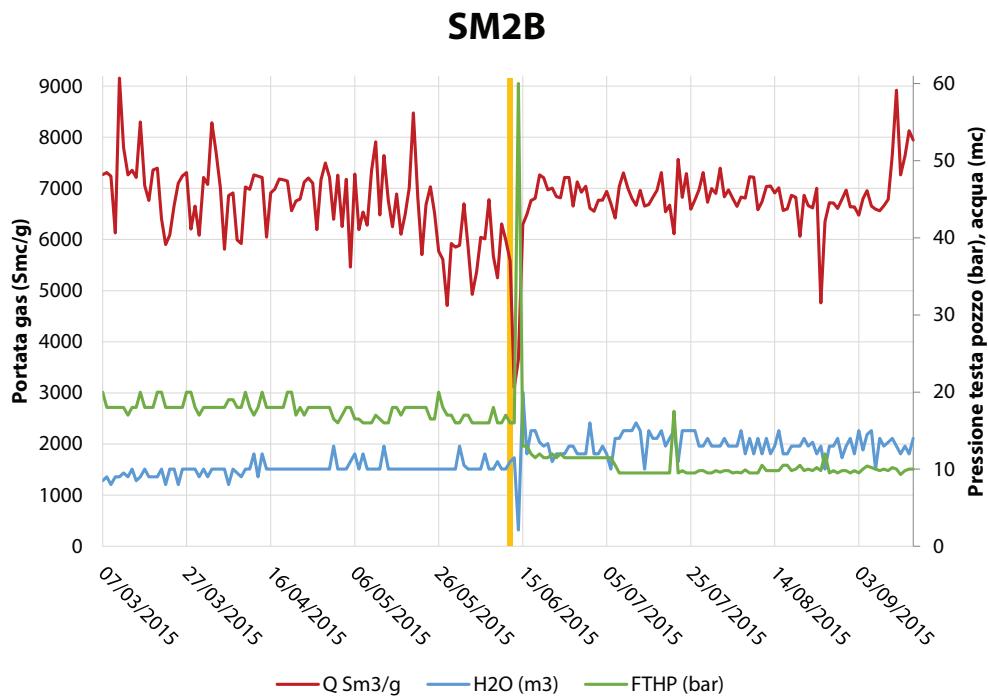
Figura 5.23: Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeno sul campo San Marco, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.

primo periodo del -25,17%

La produzione di acqua è aumentata del 20%, anche l'oscillazione attorno il valore medio è incrementata. L'acqua, come la produzione di gas, sembra essersi stabilizzata, come dimostra la diminuzione del coefficiente di variazione tra il primo e il secondo scenario (-18,77%).

A distanza di più di tre mesi dall'applicazione, non sono stati ancora impiegati stick nei pozzi del campo San Marco, applicazione che veniva effettuata sporadicamente a distanza di qualche giorno.

Scendendo nel dettaglio, si sono valutati i singoli pozzi del campo SNM. I pozzi SM2B e SM3B sono quelli che contribuiscono maggiormente alla produzione totale di gas del campo. Entrambi i pozzi hanno reagito all'applicazione in modo positivo, come testimoniano la Figura 5.24 e la Figura 5.25. In questi pozzi si ha un lieve aumento di produzione nell'ordine di qualche punto percentuale. È importante sottolineare il fatto che la pressione che governa la testa pozzo è quella valvole di regolazione (PCV, Pressure Control Valve), regolata prima del test a 15 bar, successivamente a 11 bar e infine 9 bar. La produzione di acqua è fortemente aumentata, attestandosi addirittura a un incremento del 31,86% per quanto riguarda il pozzo SM2B.

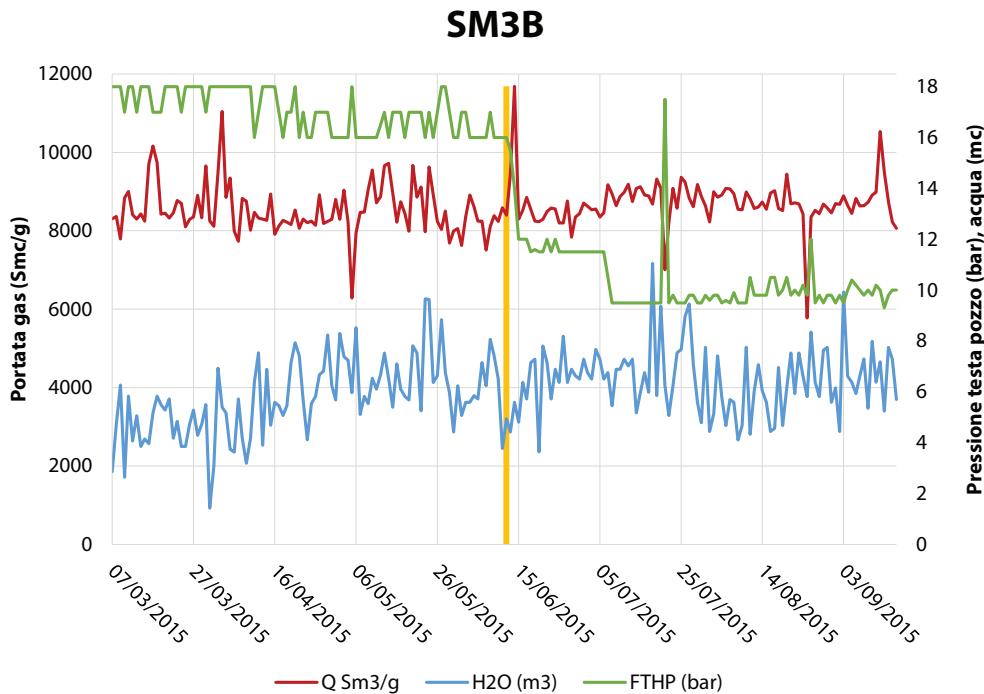


(a) Andamento di portata gas, acqua e FLP del pozzo SM2B appartente al campo San Marco, dal 07/03/2015 al 16/09/2015.

	Indice stat.	PRE-TEST	POST-TEST	Δ	$\Delta\%$
FTHP (bar)	μ_p	17,69	10,91	-6,79	-38,35%
	σ_p	1,14566	5,2287	4,08304	356,39%
	σ_p^*	6,47%	47,93%	41,46%	640,29%
Gas (Sm _c)	μ_{gas}	6714,82	6802,47	87,6524	1,31%
	σ_{gas}	764,029	675,602	-88,4269	-11,57%
	σ_{gas}^*	11,38%	9,93%	-1,45%	-12,71%
H_2O (m ³)	μ_{H2O}	9,98	13,17	3,18	31,86%
	σ_{H2O}	0,92624	1,88787	0,96	103,82%
	σ_{H2O}^*	9,28%	14,34%	5,06%	54,57%

(b) Indici statistici dei parametri relativi al pozzo SM2B, periodi 07/03-11/06 e 12/06-16/09.

Figura 5.24: Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeno sul pozzo SM2B del campo San Marco, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.



(a) Andamento di portata gas, acqua e FLP del pozzo SM3B appartenente al campo San Marco, dal 07/03/2015 al 16/09/2015.

	Indice stat.	PRE-TEST	POST-TEST	Δ	$\Delta\%$
FTHP (bar)	μ_p	17,05	10,40	-6,65	-38,99%
	σ_p	0,83137	1,29765	0,46628	56,09%
	σ_p^*	4,88%	12,48%	7,60%	155,86%
Gas (Smc)	μ_{gas}	8530,23	8712,95	182,713	2,14%
	σ_{gas}	628,882	592,611	-36,2704	-5,77%
	σ_{gas}^*	7,37%	6,80%	-0,57%	-7,74%
H_2O (m ³)	μ_{H2O}	5,73	6,48	0,75	13,08%
	σ_{H2O}	1,50841	1,30903	-0,20	-13,22%
	σ_{H2O}^*	26,33%	20,21%	-6,12%	-23,26%

(b) Indici statistici dei parametri relativi al pozzo SM3B, periodi 07/03-11/06 e 12/06-16/09.

Figura 5.25: Valutazione degli effetti dello spiazzamento con schiumogeno sul pozzo SM3B del campo San Marco, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al test.

5.3.5 Analisi costi e benefici

In Tabella 5.2 sono stati calcolati i costi associati al test e successivamente i ricavi e i costi variabili dei due scenari presi in considerazione al fine di poter calcolare così il margine finale acquisito tramite l'applicazione.

L'analisi dei due diversi scenari in Tabella 5.3 è stata eseguita calcolando

Tabella 5.2: Calcolo costi associati all'applicazione di schiumogeno.

Consumo schiuma	133 l
Consumo antischiuma	150 l
Costo unitario schiuma	5,2 €/kg
Costo unitario antisch.	4,8 €/kg
Costo iniezione	€ 1.447,69
Costo smalt. acqua	7,47 €/ton
Volume acqua stimata	12,74 m³
Costo tot agg. smaltimento	€ 95,17
COSTO TOT.	€ 1.542,86

il ricavo della produzione di gas, il costo di smaltimento dell'acqua prodotta (costo variabile) e il costo dell'iniezione (costo fisso), non presente quindi nel primo periodo di riferimento. Si è considerato un prezzo medio di vendita del gas di 0,25 €/Smc.

L'applicazione del *foamer* in linea si è concretizzata con un aumento del

Tabella 5.3: Analisi guadagno nei due diversi scenari pre- e post-test.

	PRE-TEST (07/03-11/06)	POST-TEST (12/06-16/09)
Ricavo gas	€ 432.919,25	€ 454.886,50
Costo smalt. acqua	-€ 13.437,96	-€ 16.103,64
Costo test	€ 0,00	-€ 1.542,86
Costi tot.	-€ 13.437,96	-€ 17.646,50
TOT.	€ 419.481,29	€ 437.240,00

margine di 17.758,72 €, con un giornaliero di 1.182,91 €/g. L'aumento di

margine percentuale è pari al 4,23%. L'incremento di ricavo legato alla produzione di gas è netto rispetto all'aumento dei costi totali pari a 4.208,53 €. Importante considerazione va fatta sulla rapporto costi fissi-costi variabili: la spesa relativa a *foamer* e *defoamer* rappresenta l'8,74% dei costi totali (non è apprezzabile in Figura 5.26), a conferma delle maggiori potenzialità economiche dell'applicazione per volumi di gas maggiori.

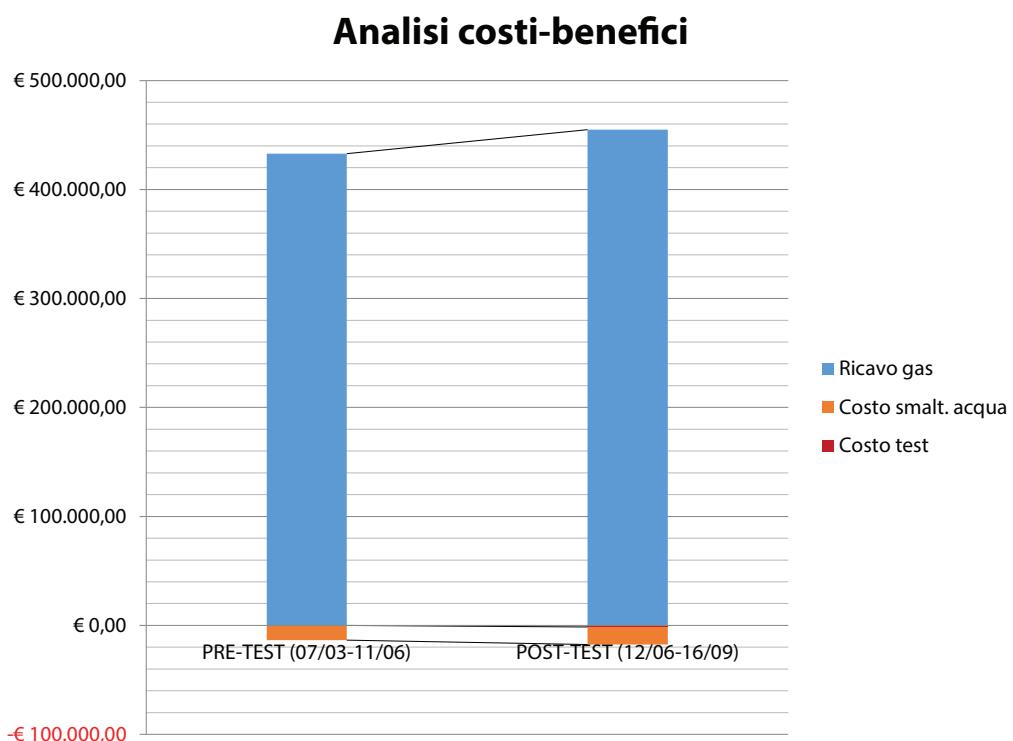


Figura 5.26: Analisi costi e ricavi per i due rispettivi scenari di riferimento.

5.3.6 Piggaggio della linea di Verdicchio

Come detto in precedenza l'intera applicazione si è basata sulle conoscenze acquisite con l'applicazione di schiumogeno in pozzo e sui valori relativi ai *pigging* sulla condotta di Verdicchio svolti in precedenza.

L'ultima operazione di piggaggio della linea di Verdicchio è stata effettuata il

30 luglio 2013. L'applicazione è stata eseguita in concomitanza di una riparazione alla condotta resasi necessaria in seguito a un danno arrecato durante degli interventi sulla rete fognaria adiacente. Il giorno 28 luglio 2015 è stata fermata la produzione ed la condotta è stata bonificata tramite l'iniezione di azoto. In seguito sono cominciate le operazioni di riparazione, durate due giorni.

Il 30 luglio 2013 è stata effettuata l'operazione di piggaggio della linea. L'operazione ha avuto come fine la pulizia della condotta in seguito agli interventi di riparazione e lo spiazzamento dell'acqua collocata in particolare negli avvallamenti. L'utensile impiegato è stato uno scovolo a mandrino dotato di dischi di supporto e guarnizioni a tazza per la tenuta idraulica e la propulsione. Lo strumento era inoltre dotato di segnalatore elettronico, il quale segnalava la posizione lungo la condotta tramite degli indicatori di posizione installati sulle canalette di intercetto. Il mezzo di propulsione impiegato è azoto. Lo scovolo è stato inviato dalla trappola di lancio del campo Verdicchio (Figura 5.27) ed è giunto alla trappola di ricezione della centrale SGM.



(a) Vista laterale.



(b) Vista frontale.

Figura 5.27: Trappola di lancio del campo Verdicchio.

L'operazione ha avuto durata complessiva di 6 ore, l'acqua spiazzata è

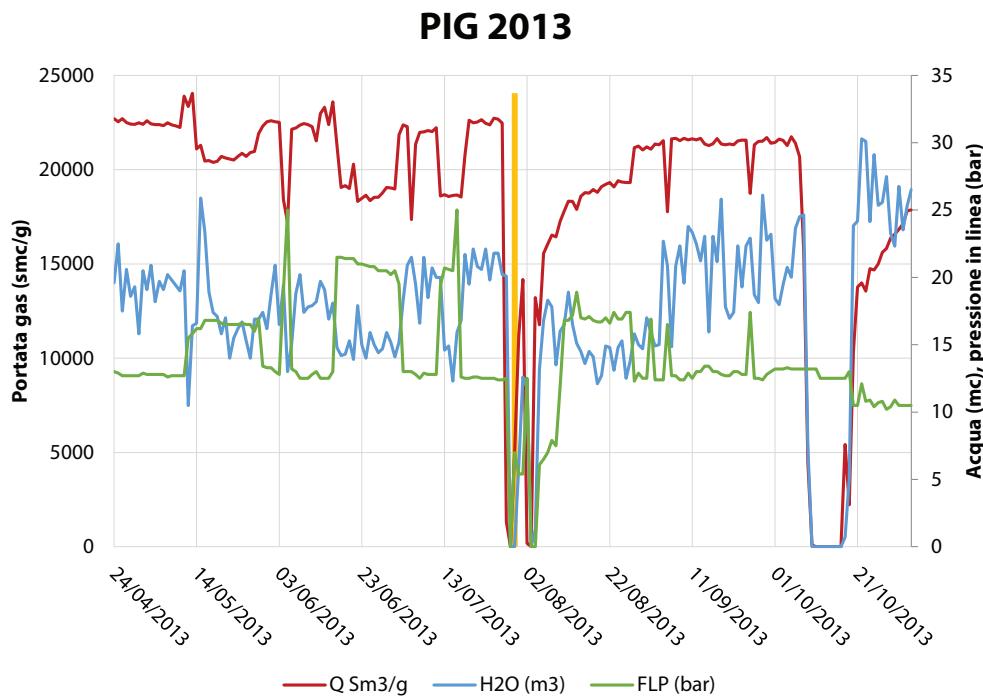
stata di circa 14,5 m³, valore in linea con l'acqua spiazzata tramite l'utilizzo dello schiumogeno. Al termine dell'operazione è stata riavviata la produzione in linea e si è proceduto allo spurgo della linea: il gas è stato convogliato alla torcia fredda fintanto che i valori di gas metano non hanno raggiunto nuovamente il 98%. Durante il *pigging* non è stato possibile rilevare la posizione dello scovolo lungo la condotta, a causa della rottura immediata del dispositivo di segnalazione una volta lanciato dalla trappola.

Il 2 agosto è stato effettuato un altro lancio, questa volta un pig in schiuma solida con rivestimento in poliuretano, il quale ha permesso il recupero dei frammenti del dispositivo di rilevazione e un'ulteriore disidratazione. La propulsione è sempre avvenuta per mezzo gassoso (azoto) e ha richiesto bonifica e spurgo rispettivamente prima e dopo il lancio.

La Figura 5.28 mostra l'andamento dei parametri di gas, pressione in linea e acqua prodotta della linea di San Marco. L'intervallo di tempo scelto va dal 24 aprile 2013 al 3 novembre 2013. Come per la valutazione dell'efficacia dello schiumogeno, la serie temporale comprende 97 giorni prima e dopo il piggaggio della linea. Nonostante gli indici statistici siano stati proposti anche in questa occasione, non consentono di acquisire informazioni aggiuntive poiché sono fortemente influenzati dall'interruzione della linea di quattro giorni utile alla riparazione della condotta con doppio piggaggio (dal 28 luglio al 2 agosto 2013) e dai controlli decennali di tenuta idraulica degli impianti di San Marco (dal 7 al 19 ottobre 2013).

Prima del piggaggio la produzione oscillava sensibilmente attorno ai 22 Sm-c/g, con una produzione di acqua attorno ai 12 m³/g e la pressione della linea che si aggira attorno ai 13 bar. Le forti oscillazioni dei parametri sono da ricollegare agli interventi alla centrale SGM: a volte la produzione è stata fermata oppure si è operato in condizioni di alta pressione. Di conseguenza in corrispondenza di picchi di alta pressione si ha una minore produzione. Questa informazione continua a confermare come la produzione sia profondamente legata ai valori di contropressione a valle.

Dopo l'applicazione del piggaggio la produzione è tornata ai valori originali



(a) Andamento di portata gas, acqua e FLP del campo San Marco, dal 24/04/2013 al 03/11/2013.

	INDICE STAT.	PRE-PIG	POST-PIG	Δ	$\Delta\%$
FTHP (bar)	μ_p	15,18	12,63	-2,55	-16,82%
	σ_p	3,91490272	3,32412879	-0,590774	-15,09%
	σ_p^*	25,79%	26,32%	0,54%	2,08%
Gas (Smc)	μ_{gas}	20652,9082	16487,9479	-4164,96	-20,17%
	σ_{gas}	3720,93721	6792,04273	3071,106	82,54%
	σ_{gas}^*	18,02%	41,19%	23,18%	128,65%
H_2O (m ³)	μ_{H2O}	17,53	16,90	-0,63	-3,61%
	σ_{H2O}	3,73482088	7,8300456	4,10	109,65%
	σ_{H2O}^*	21,30%	46,33%	25,03%	117,50%

(b) Indici statistici dei parametri relativi al campo San Marco, periodi 24/04/2013-29/07/2013 e 30/07/2013-03/11/2013.

Figura 5.28: Valutazione degli effetti dello spiazzamento con piggaggio sul campo San Marco, confronto grafico e numerico delle condizioni di produzione precedenti e successive al *pigging*.

solo dopo 30 giorni. Ciò testimonia il fatto di come i pozzi abbiano inerzia propria e al fine di mantenere delle condizioni costanti di produzione vanno evitati *shut-down* prolungati.

La pressione in linea è cambiata solo momentaneamente: se la pressione era diminuita fino a 6,5 bar a distanza di sei giorni dal piggaggio e quattro giorni dall'avvio della produzione, questo valore è aumentato velocemente e in appena 10 giorni la pressione in linea è tornata a circa 12 bar: il piggaggio sembra che in qualche modo non abbia funzionato correttamente oppure non abbia garantito lo spiazzamento adeguato della condotta.

L'aumento di acqua prodotta è consistente, oscilla attorno ai 25 m³/g nella parte finale della serie temporale, con un aumento quindi di 3 m³ giornalieri.

Confronto fra l'applicazione di schiumogeno e il piggaggio in condotta

L'applicazione di schiumogeno ha richiesto solamente un'ora di tempo. L'intervallo di tempo risulterebbe inferiore in una seconda eventuale operazione poiché gli step del caricamento di schiumogeno, dato il deficit di esperienza nel trattamento, sono stati effettuati in modo ponderato. Il piggaggio della condotta ha richiesto invece 6 ore, tempo intercorso tra il lancio e la ricezione del pig in centrale. Tale tempo non rispecchia la durata totale delle operazioni. La condotta è stata inizialmente bonificata tramite l'immissione di azoto e, una volta giunto lo scovolo in centrale, la produzione di gas non è tornata a regime fintanto che la concentrazione di metano non ha raggiunto il 98%. Si può dire quindi l'intera operazione di piggaggio abbia richiesto un intero turno lavorativo. Nel caso specifico, a causa della rottura del dispositivo di posizione dello scovolo in condotta, è stato richiesto un secondo lancio: il tempo richiesto è quindi raddoppiato.

Lo schiumogeno è stato immesso in condotta da due operatori interni: in termini economici i costi iniziali sono associati al solo prodotto impiegato. Il piggaggio della linea è stato effettuato da una ditta esterna e il personale della centrale si è concentrato sull'applicazione, data la delicatezza dell'ope-

razione. Lo schiumogeno risulta quindi un'applicazione di maggiore successo anche dal punto di vista economico e logistico.

Gli effetti del piggaggio della condotta sono stati confrontati con quelli relativi all'applicazione di *foamer*. I due intervalli temporali sono stati sovrapposti e sono stati valutati gli andamenti di portata, pressione in linea e acqua prodotta. Sia il piggaggio che l'applicazione di *foamer* sono stati effettuati il giorno 98 delle rispettive serie temporali di riferimento.

La Figura 5.29 confronta i valori di portata dal 24 aprile 2015 al 3 novembre 2013 (serie chiamata "PIG") e dal 7 marzo 2015 al 16 settembre 2015 (serie chiamata "FOAMER"). È chiaro fin da subito come l'applicazione di

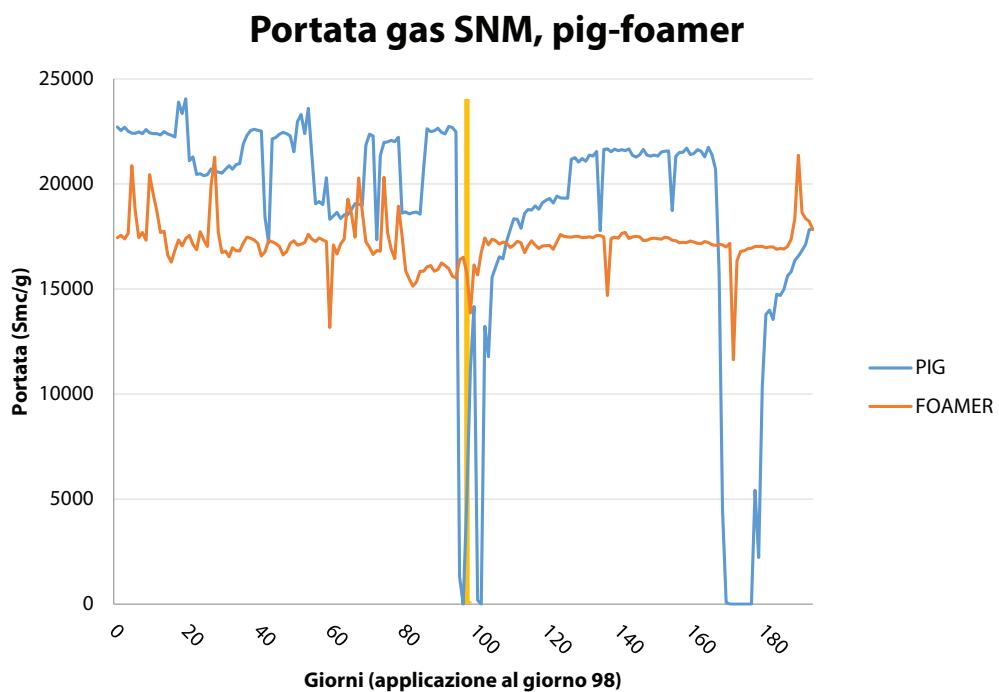


Figura 5.29: Confronto dell'andamento dei valori di portata di campo San Marco tra l'intervallo temporale relativo al piggaggio (dal 24 aprile 2015 al 3 novembre 2013) e l'intervallo temporale dell'applicazione di schiumogeno in condotta (dal 7 marzo 2015 al 16 settembre 2015). Entrambe le operazioni sono state svolte il giorno 98 della serie temporale.

schiumogeno, grazie alla velocità di esecuzione, permetta di ristabilire la produzione a valori in linea a quelli precedenti. L'inerzia dei pozzi aumenta con l'estensione del periodo di interruzione, la produzione dopo l'operazione di piggaggio ha raggiunto valori abituali solo a distanza di qualche giorno.

Dopo l'applicazione dello schiumogeno la produzione ha subito acquisito andamento costante, condizione raggiunta dal piggaggio dopo 30 giorni e mai così regolare come lo scenario relativo al *foamer*. Per entrambe le serie non si rilevano aumenti di produzione, questo aspetto è legato comunque all'energia di giacimento, ormai nella fase finale del ciclo di vita.

La Figura 5.30 mostra i valori della pressione in linea relativi ai due scenari di riferimento. Con l'applicazione dello schiumogeno la pressione della linea

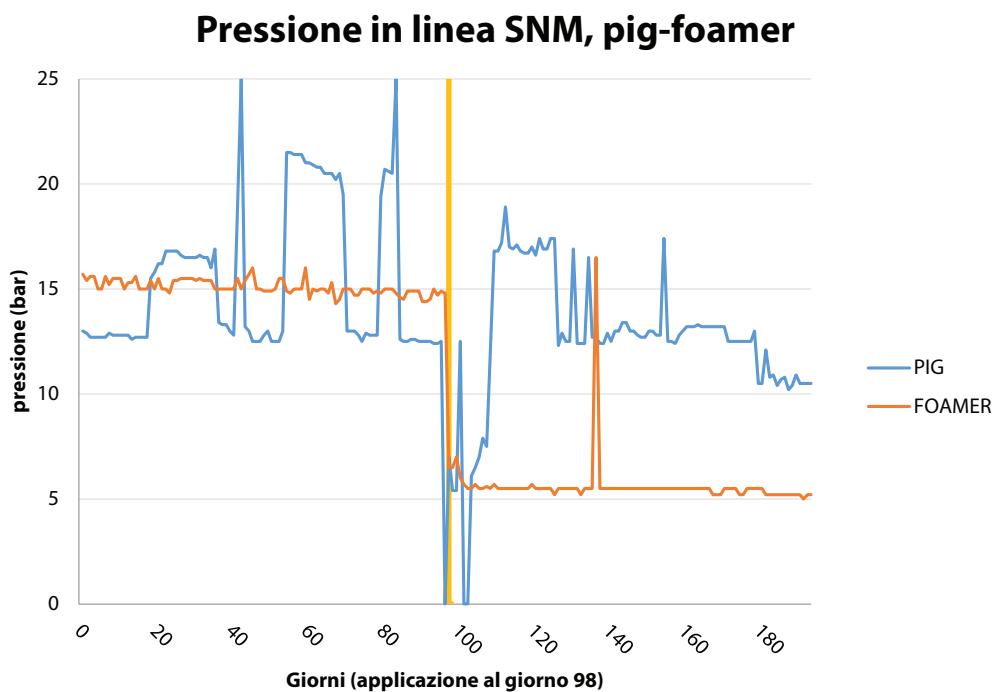


Figura 5.30: Confronto dell'andamento dei valori di pressione in linea di campo San Marco tra l'intervallo temporale relativo al piggaggio (dal 24 aprile 2015 al 3 novembre 2013) e l'intervallo temporale dell'applicazione di schiumogeno in condotta (dal 7 marzo 2015 al 16 settembre 2015). Entrambe le operazioni sono state svolte il giorno 98 della serie temporale.

è scesa immediatamente a circa 5,5 bar e tale valore è stato mantenuto per tutto il periodo di monitoraggio. Tale valore costante testimonia l'assenza di fenomeni di accumulo di acqua successivi all'operazione di spiazzamento.

Ciò non può essere detto del piggaggio: nonostante l'operazione sia stata effettuata ben due volte (pig di pulizia e pig in schiuma), la pressione in linea è tornata ai valori originali in brevissimo tempo. Il piggaggio non ha creato le condizioni utili al mantenimento di bassi valori di contropressione in linea, sinonimo del fatto di come l'acqua abbia di nuovo invaso gli avvallamenti della condotta.

La Figura 5.31 esprime sotto forma di grafico l'acqua prodotta durante i due archi temporali presi in esame. Con il piggaggio la produzione di acqua è

Acqua di produzione SNM, pig-foamer

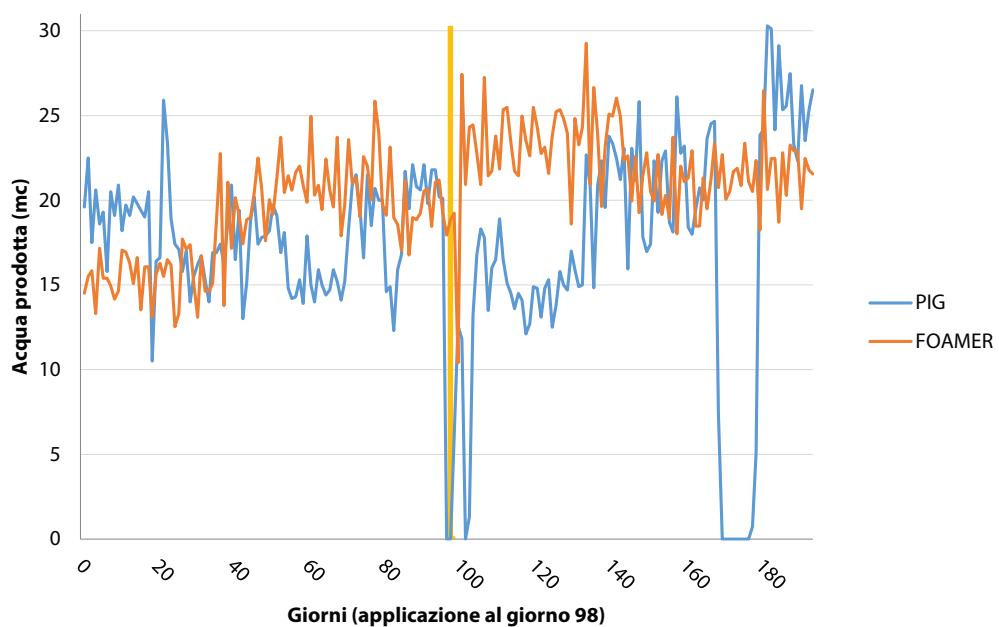


Figura 5.31: Confronto dell'andamento dei valori di acqua prodotta di campo San Marco tra l'intervallo temporale relativo al piggaggio (dal 24 aprile 2015 al 3 novembre 2013) e l'intervallo temporale dell'applicazione di schiumogeno in condotta (dal 7 marzo 2015 al 16 settembre 2015). Entrambe le operazioni sono state svolte il giorno 98 della serie temporale.

di poco aumentata, in linea con l'aumento della produzione di gas naturale. Non si riscontrano particolari cambiamenti nella regolarità dell'andamento. Con il piggaggio l'andamento dei volumi di acqua è inizialmente diminuita, per poi tornare a valori consueti dopo 28 giorni.

La quantità d'acqua misurata non corrisponde all'effettivo volume prodotto dal pozzo, ma dalle quantità registrate nelle vasche di raccolta di San Marco. In caso di cuscini d'acqua considerevoli, il separatore può non agire in maniera ottimale e il fluido può bypassare il processo di separazione gas-liquido. La diminuzione dei valori di acqua prodotta è associata a una maggiore produzione della stessa ma non correttamente gestita dai separatori.

L'ipotesi giustifica anche l'aumento repentino della contropressione a pochi giorni dal piggaggio della condotta: l'acqua non trattata dai separatori sul campo di San Marco ha invaso nuovamente gli avvallamenti appena spiazzati con pig.

5.3.7 Discussione dei risultati

I risultati ottenuti dal testo hanno portato alla conclusione che il principio alla base del test non sia la diminuzione della tensione superficiale, bensì la creazione di un "pig chimico" stabile lungo tutto il tragitto, capace di spiazzare l'acqua da tutta la condotta sotto forma di un unico cuscino (Figura 5.32).

L'ipotesi viene confermata dall'ingente volume d'acqua giunto alla centrale SGM: più del 50% del volume totale in circa 10 minuti.

In base all'affermazione formulata, l'iniezione di schiumogeno in condotta risulta irrilevante ai fini della buona riuscita dell'operazione. Nelle operazioni di *deliquification* e di attenuazione del battente idrostatico a fondo pozzo, il batch di schiumogeno costituisce un'operazione preliminare di valutazione dell'efficacia del *foamer* oppure garantisce uno shock iniziale per l'attivazione del prodotto in soluzione. In questo caso il batch rappresenta l'applicazione. Il fenomeno può essere spiegato da tre condizioni iniziali:

- **composizione:** l'introduzione di *foamer* e acqua contemporaneamente del volume di mandata ha fatto sì che si creasse un fronte di schiuma

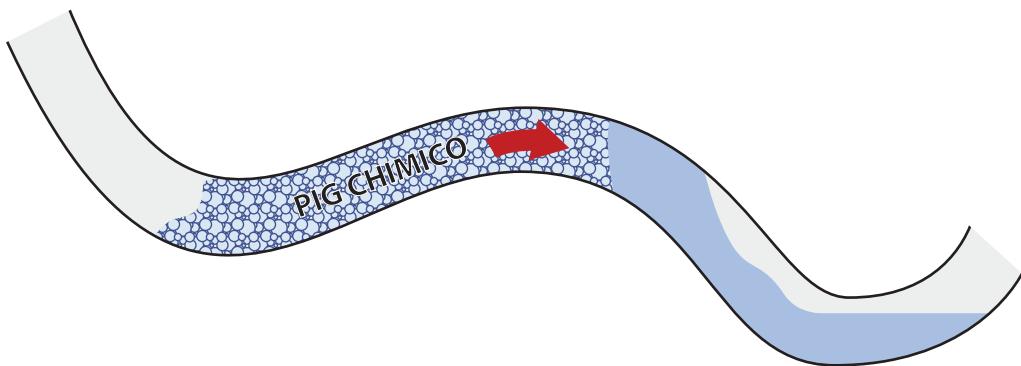


Figura 5.32: Pig chimico, spiazzamento della condotta in un unico cuscino d'acqua tramite schiumogeni.

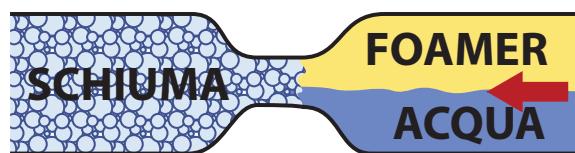
già alla mandata;

- **geometria:** sulla mandata di SNM, praticamente a valle di tutto il volume di batch, è presente una valvola di regolazione, la quale agisce su un Venturi. La valvola aumenta così la velocità del fluido, quindi le turbolenze, generando un fronte di schiuma ad alta velocità, capace di spiazzare l'acqua nelle condotte (Figura 5.33);
- **pressione:** l'interruzione della linea e la depressurizzazione del tratto di linea interessato dall'applicazione ha permesso un incremento della variazione di pressione, con l'aumento di efficacia della PCV sulla generazione del fronte compatto di schiuma.

L'utilizzo del *foamer* come pig chimico presenta notevoli vantaggi rispetto all'impiego del schiumogeno per diminuire la tensione superficiale tra le due fasi e favorire così la miscibilità tra l'acqua e gas naturale. In linea teorica il pig chimico ha maggiore capacità pulente rispetto all'iniezione in continuo del foamer, sia per l'azione su tutta la circonferenza interna della condotta, sia per l'alta velocità del fronte di schiuma, quindi il trascinamento della componente solida di fondo.



(a) PCV Fisher, valvola di generazione schiuma.



(b) Dettaglio della miscela acqua-foamer e generazione della schiuma tramite il restringimento della condotta.

Figura 5.33: Influenza della PCV collocata sulla linea di mandata di San Marco nella produzione del fronte di schiuma

Confronto con altre applicazioni

L’impiego degli schiumogeni è ormai affermato per l’attenuazione del battente idrostatico dei pozzi a gas, ma ad oggi sono pochi gli studi sulle condotte in orizzontale, nonostante i principi tecnici e i risultati fin qui ottenuti siano incoraggianti. Sono state considerate due applicazioni di schiumogeno in orizzontale al fine di confrontare i risultati ottenuti.

Heuvel et al. (2011) (Champion Technologies), propone l’applicazione di schiumogeno di una condotta a terra lunga 12.000 metri e da Ø 12" di diametro. La linea è caratterizzata da cinque avvallamenti con pendenza massima del 6% e variazioni di quota nell’ordine dei 25 metri. Il volume di acqua associato all’*hold-up* si attesta a 20 m³. La pressione di mandata iniziale è di 30,5 bar mentre quella di arrivo di 25,5: il conseguente valore di contropressione è di 5 bar.

Gli autori del test sono stati molteplici poiché sono state consultate molte aziende esterne e sono stati provati numerosi prodotti. Ogni compagnia ha

immesso un suo schiumogeno in condotta per 5 giorni, i successivi 3 giorni si è interrotta l'immissione al fine di non influenzare l'efficacia del prodotto utilizzato nella sessione successiva.

I risultati ottenuti sono:

- contropressione della linea scesa di circa il 30%, quindi con un valore finale di 3,5 bar;
- attenuamento dell'*hold-up* in linea con lo spiazzamento dell'85% (17 m³) di acqua in condotta;
- aumento generico della produzione di gas.

L'impiego del pig chimico sembra essere una soluzione di maggiore successo soprattutto per i tempi di esecuzione: mentre la procedura di spiazzamento della linea Verdicchio è avvenuta in poco più di due ore, in questo caso i risultati sono stati apprezzabili solo a distanza di giorni. Il pig chimico permette inoltre uno spiazzamento completo della condotta, la quale presenta delle contropressioni irrisorie (0,5 bar). L'iniezione in continuo ha permesso lo spiazzamento di grandi quantità d'acqua ma non la completa rimozione dei volumi interni: i 3 m³ rimasti ancora in condotta continuano a generare contropressioni rilevanti.

Passucci et al. (2015) (ENI e Baker Hughes) presenta invece l'impiego di schiumogeni in continuo in una condotta da ø 36", lunga 50.000 metri. La condotta parte da una quota di -35 metri per giungere alla centrale posta a livello del mare. Il tragitto non è caratterizzato da variazioni di altitudine, quindi non sono presenti avvallamenti. La portata media giornaliera è di circa 3.000.000 Smc/g. La pressione di arrivo della condotta è di 12,5 bar e si è calcolato che per l'abbattimento totale dei fenomeni di *hold-up* si richiede un abbassamento della contropressione in linea di 1 bar. L'acqua totale stimata in condotta è di 2.500 m³. La linea non è stata piggata per molto tempo, perciò risulta alta la probabilità che il pig rimanga incastrato durante il passaggio dello stesso in condotta. Il *foamer* è stato iniettato per 5 gior-

ni e sono stati monitorati i parametri di produzione per valutare l'efficacia dell'applicazione. Si sono raggiunti i seguenti risultati:

- aumento massimo della produzione del 5%, rappresentato dal picco a solo 5 giorni dall'inizio del test;
- diminuzione della contropressione di 0,5 bar raggiunta a poco tempo dall'applicazione, effetto visibile anche nelle successive 3 settimane,;
- aumento della produzione cumulativa (nell'arco di 3 settimane) del 2,2%.

Un confronto dello spiazzamento della linea Verdicchio con tale applicazione non è propriamente corretto, dato che le condizioni al contorno differiscono in maniera sostanziale. Tuttavia si può sempre sottolineare il fatto che anche in questo caso l'impiego di un pig chimico richiede molto meno tempo e i risultati sono apprezzabili in poche ore, al contrario dell'azione dello schiumogeno in continuo. Anche in questo caso il pig chimico sembra essere una soluzione vincente, tuttavia non si conosce l'efficacia del metodo per condotte di grandi dimensioni.

Ottimizzazione del processo

Come detto in precedenza, la generazione del pig chimico è avvenuto grazie alle condizioni geometriche della condotta, le alte pressioni a monte del batch e l'immissione di schiumogeno e acqua assieme. Si cerca ora in via qualitativa di fornire delle indicazioni su come questa applicazione possa essere impiegata su altre condotte, ricreando le condizioni utili alla riuscita dell'operazione. La schiuma (Karam 2013) è definita come un mezzo stabile in cui il gas è disperso uniformemente all'interno di una fase liquida continua. Di conseguenza questo mezzo può essere definito come un fluido omogeneo caratterizzato da viscosità e densità variabile. Dal punto di vista fluidodinamico, la schiuma si considera l'unico caso di fluido non newtoniano (dilatante) comprimibile ed è dotata di tensione di snervamento propria e sforzo di taglio non lineare.

La variazione di viscosità in condotta è fortemente legata alla qualità della schiuma Γ , definita come:

$$\Gamma = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} \quad (5.3.1)$$

dove Q_g e Q_l sono rispettivamente la portata della fase gassosa e della fase liquida. La figura Figura 5.34 mostra l'andamento della viscosità apparente μ_{app} in relazione alla variazione della qualità della schiuma. Per bassi valori

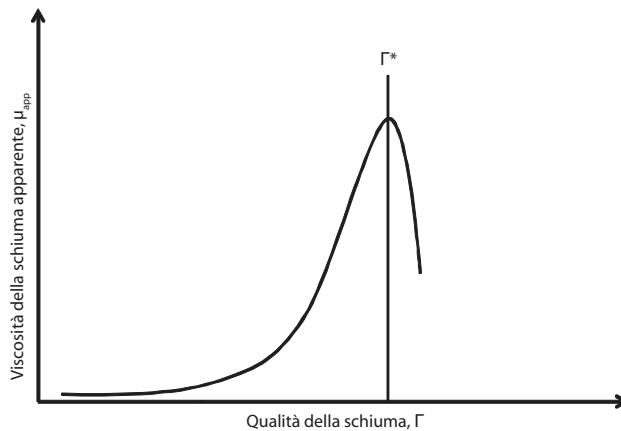


Figura 5.34: Rappresentazione schematica della relazione tra viscosità apparente e qualità della schiuma (Gajbhiye et al. 2011).

di Γ , la viscosità tende a mantenere un valore costante. Con l'aumentare della fase gassosa nella schiuma questo valore raggiunge un picco massimo, in corrispondenza della qualità di schiuma Γ^* . In caso di ulteriore aumento del gas, la viscosità tende a diminuire velocemente.

Briceno et al. (2003) ha studiato i regimi schiuma in condotta variando la qualità della schiuma con il controllo della portata gassosa e liquida. Con bassi valori della qualità della schiuma, il flusso ha regime stratificato e sono facilmente distinguibili due flussi caratterizzati da diverse velocità e dimensione delle bolle diverse. In questo caso l'azione di drenaggio della schiuma prevale sulla turbolenza del moto. Con l'aumentare della qualità della schiuma, quindi della portata gassosa, l'effetto di drenaggio tende ad attenuarsi e si arriva alla condizione in cui la schiuma è caratterizzata da bolle di aria di piccole dimensioni alla stessa velocità e dall'assenza di deformazioni al taglio.

Il regime è definito di *plug flow*: la schiuma si muove per cuscini compatti o rigidi, conservando la trama delle bolle nel tempo (Figura 5.35). Questo

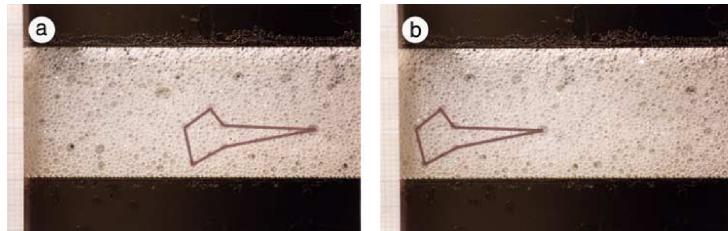


Figura 5.35: Sequenza temporale dello scorrimento di schiuma in condotta in configurazione di cuscino compatto, la trama delle bolle rimane costante nel tempo (Briceno et al. 2003).

cuscino scorre su dei finissimi *layer* d'acqua a contatto con le pareti, generati dalla rottura delle bolle localizzate sul perimetro interno della condotta. Il regime in esame corrisponde alle condizioni di massima viscosità viste in precedenza, quindi si ottiene per valori prossimi al valore teorico Γ^* . Per Briceno et al. (2003), il *plug flow* si ottiene per valori della qualità di schiuma tra l'89% e il 97%. In caso di valori di valori elevati della qualità della schiuma, la dispersione del gas diventa disomogenea e le bolle tendono a disgregarsi per coalescenza fino ad arrivare a condizioni di *slug*, in cui cuscini di aria si alternano a cuscini di schiuma.

Poiché le caratteristiche della schiuma dipendono dalle dimensioni delle bolle e dalla *texture* delle bolle, il *plug flow* corrisponde al regime ideale per la buona riuscita dello spiazzamento con acqua del pig chimico. Inoltre il moto a cuscino rigido permette di mantenere il fronte di schiuma compatto, poiché il flusso in queste condizioni non è controllato dalla reologia della schiuma stessa. In questo modo si garantiscono sufficienti quantità di moto una volta a contatto con i depositi d'acqua in linea.

Il valore Γ^* della schiuma definisce quindi il confine di alta e bassa qualità della schiuma, a seconda delle condizioni di flusso nella condotta rispettivamente stratificate o a cuscini. Gajbhiye et al. (2011) fornisce una mappa di regime della schiuma in condotta del tutto simile a quelle relative dei flussi

bifase Figura 5.36. Sulla parte in alto a destra del grafico si posizionano i

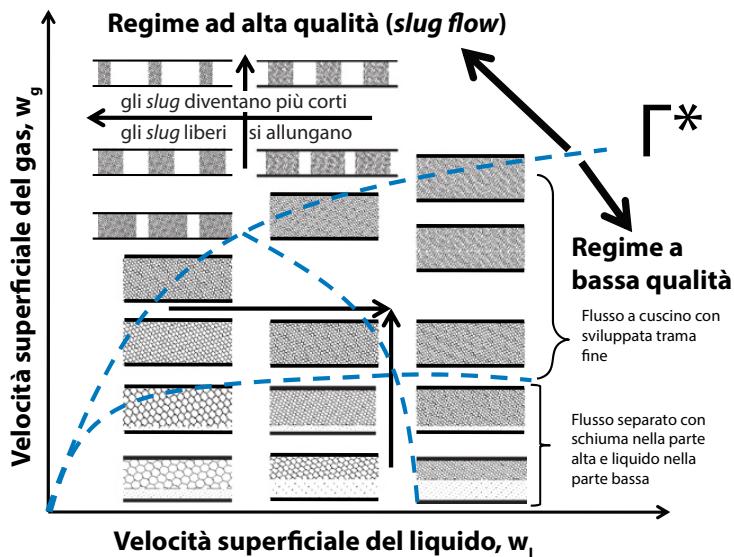


Figura 5.36: Schematizzazione della caratterizzazione del flusso di una schiuma in condotte orizzontali basata sulla trama e sul regime di moto (Gajbhiye et al. 2011).

regimi a cuscini rigidi, con trama della schiuma fine e definita, al di sotto troviamo le schiume stratificate e al di sopra sono presenti i regimi a *slug*. La progettazione del metodo deve prevedere un'attenzione particolare sulla modalità di generazione e lancio della schiuma, in relazione alle condizioni di produzione condotta di interesse. Solitamente i *loop* per lo studio dei regimi di flusso o applicazioni sperimentali di schiuma in condotta (Karam 2013) generano la schiuma in tre modi diversi:

- **in-situ**: la schiuma viene generata per agitazione e immessa in linea;
- **in linea**: la generazione avviene tramite l'immissione della soluzione acqua-schiumogeno, esattamente il caso del test di Verdicchio;
- **in linea ausiliaria**: una volta caricato un *bypass* della condotta con la soluzione acqua-foamer, la produzione viene parzialmente o totalmente deviata.

Si evidenzia come la reologia della schiuma in condotta vari notevolmente in funzione di numerosi parametri come la temperatura, pressione, qualità e *texture* (e.g. dimensione delle bolle), iterazione con la parete interna e concentrazione dello schiumogeno. Data la complessità del problema si tende a scartare la generazione della schiuma in ambiente esterno, poiché la reologia cambierebbe immediatamente nelle condizioni di produzione in tubazione. La soluzione in linea è stata valutata tramite il test Verdicchio e ha come unico svantaggio l'interruzione della produzione al fine di caricare il batch in condotta.

La soluzione più interessante è rappresentata dall'installazione di un *bypass* dedicato. La linea ausiliaria consentirebbe la generazione della schiuma senza interruzione della produzione. Tale dispositivo potrebbe rappresentare la trappola di lancio del pig chimico, in cui quest'ultimo viene generato e mandato in linea allo stesso tempo. Tale camera, isolata dalla condotta prima del lancio, permetterebbe il controllo totale delle parametri iniziali di lancio tramite valvole o variazioni geometriche, oltre che eventualmente la verifica istantanea della buona generazione di schiuma tramite strumentazione di misura dedicata.

Conclusioni

Obiettivo principale del lavoro svolto è la conferma dell'efficacia di schiumogeni per lo spiazzamento di liquidi in condotta, sulla falsa riga delle applicazioni di tensioattivi per i pozzi affetti da *liquid loading*. Nello specifico si è cercato di valutare l'efficacia contro i fenomeni di *hold-up* in condizioni orizzontali, sia nell'immediato che nelle settimane successive all'applicazione. Il test è stato confrontato con operazioni di piggaggio precedenti per capire quanto questa tecnologia possa essere percorribile in un futuro prossimo.

Il test ha portato allo spiazzamento della condotta in poche ore, con un volume di acqua confluito a valle che rispecchia le quantità di liquido rimosso dai precedenti piggaggi della linea. La contropressione in linea ha subito una brusca diminuzione e ha raggiunto valori minimi dopo solo alcune ore dall'esecuzione del test.

Nelle settimane successive all'operazione, il monitoraggio dei parametri di produzione ha evidenziato che i valori di contropressione sono rimasti costanti anche a distanza di settimane, testimoniando il fatto di come il metodo abbia migliorato le condizioni di trasporto nel breve-medio periodo. La produzione di gas è aumentata grazie alle minori cadute di pressione nella linea a valle. Oltre all'incremento della portata di gas, si è ottenuto una maggiore costanza nei valori di produzione. Ciò costituisce un buon segnale sui benefici che una condotta caratterizzata da basse cadute di pressione può portare ai relativi pozzi a gas. L'ottimizzazione della produzione ha visto una nuova configurazione delle valvole regolatrici, consentendo di far lavorare i pozzi a minori valori di contropressione. Anche le altre soluzioni per il

miglioramento produttivo come i *foamer stick* non si sono resi più necessarie dopo lo spiazzamento della condotta. In generale l'acqua di produzione è aumentata ma il breve tempo necessario all'operazione ha evitato problemi legati all'interruzione prolungata della linea. Il piggaggio necessita di maggiori tempi operativi e lo *shut-down* richiesto porta all'innalzamento delle pressioni a testa pozzo. All'avvio della produzione, le maggiori portate di gas sono accompagnate da importanti cuscini d'acqua, ingestibili dai separatori di campo e gli avvallamenti sono nuovamente invasi dal liquido.

I risultati si raccordano con i presupposti teorici iniziali. L'*hold-up* in condotta non è stato soltanto attenuato, bensì totalmente abbattuto e inibito nelle successive settimane dal test. L'ultima considerazione formulata trova conferma nei valori della contropressione in linea, la quale in seguito non si è mai innalzata e ha mantenuto costante il suo valore nella fase di monitoraggio post-test. Lo spiazzamento totale d'acqua non è avvenuto in maniera costante come ipotizzato ma si è realizzato in soluzione unica, offrendo dei nuovi scenari per applicazioni di questo genere. Le condizioni di produzione sono migliorate come previsto, dato il forte legame tra cadute di pressione e portata in condotta. La regolarità negli andamenti di produzione costituisce un buon risultato in termini di rendimenti del pozzo. L'irregolarità della portata di gas è associata nel termine vita di un pozzo a fenomeni di *liquid loading*: una minore contropressione a monte, in questo caso garantita dal nuovo settaggio della PCV, garantisce energia sufficiente al pozzo per evitare ulteriori incrementi della colonna idrostatica a fondo pozzo. Le precedenti condizioni favoriscono il trasporto d'acqua in superficie con cuscini d'acqua più piccoli, quindi più facilmente gestibili dai dispositivi di separazione presenti sull'area pozzo.

I tempi attesi per la riuscita dell'applicazione sono andati al di là di qualsiasi buona aspettativa. Lo schiumogeno ha agito come batch unico e compatto in linea, ridefinendo l'applicazione in questo lavoro come "pig chimico". La soluzione presenta notevoli vantaggi rispetto alla all'immissione di schiumogeno. L'attivazione del meccanismo di spiazzamento non avvie-

ne al raggiungimento della concentrazione voluta in acqua, ma la schiuma è generata in corrispondenza del punto di lancio. Il pig chimico non richiede l'installazione di pompe di iniezione con trattamento in continuo, associate a costi operativi maggiori. La soluzione unica si concretizza in una riduzione di costi ed è anche molto più accattivante per la semplicità di esecuzione.

Oltre alle valutazioni sull'efficacia del metodo su breve-medio periodo, è utile soffermarsi sui potenziali benefici a lungo termine che interessano l'impianto. La possibilità di operare con condotte caratterizzate da contropressioni ridotte garantisce vantaggi su lunga durata, quindi influisce sui costi di manutenzione straordinaria. L'utilizzo di schiuma permette inoltre una veloce e rapida pulizia della condotta da residui solidi di produzione e diminuisce l'eventuale corrosione a opera di batteri solfato-riduttori provenienti da giacimenti acidi di gas. Data la conformazione del pig chimico, l'efficacia di pulizia è garantita su tutta la parete interna della condotta.

Questa applicazione rappresenta di per certo un'interessante alternativa al tradizionale pig meccanico. Il batch di schiuma può essere utilizzato dove la condotta non è piggabile (per motivi geometrici o di impianto) e risulta essere un intervento meno invasivo rispetto a quello meccanico, prevenendo eventuali danni causati dal trascinamento del pig durante lo spiazzamento dell'acqua. I guadagni maggiori si hanno in termini di tempo e denaro, operando nell'arco di alcune ore e con l'ausilio di meno personale sul posto.

La soluzione può essere vista anche come alternativa al piggaggio relativo al trattamento chimico in condotta. In caso di trattamento spinto da realizzarsi su tutta la parete interna, i metodi oggi adottati sono l'immissione di batch chimici accompagnati da pig di separazione a tenuta idraulica oppure l'utilizzo di scovoli dotati di serbatoio interno al mandrino e ugelli per l'irrorazione del prodotto in linea. Il pig chimico può essere associato ad altri prodotti, consentendo anche l'ottima efficacia di trattamento chimico in termini di tempo e senza l'impiego di dispositivi meccanici.

A causa dello svolgimento del test su un'unica condotta non sono disponibili ulteriori indicazioni. La carenza di esperienza rappresenta oggi un forte

limite per lo sviluppo della tecnica. La reologia di una schiuma è influenza da notevoli parametri e la raccolta di maggiori informazioni potrebbe fornire ulteriori dettagli per l'interpretazione del problema, di per se complesso.

La prima incognita è associata all'efficacia del pig chimico in condotte di diversa dimensione da quella trattata in questo lavoro. In particolare le condotte caratterizzate da diametri importanti potrebbero trovare maggiori difficoltà nell'impiego del batch, dove i volumi di acqua in condotta sono ingenti e di conseguenza le quantità di schiuma da immettere sono enormi. Per la condotta su cui è stato condotto il test non è stata definita una procedura operativa consolidata. Il *know-how* relativo alla tecnica può essere esteso solo grazie a ulteriori prove sul campo. Tali test possono essere effettuati solo al ristabilirsi delle condizioni di contropressione precedenti, le quali continuano a rimanere costanti a distanza di mesi.

Nonostante l'evidente efficacia e i numerosi vantaggi rispetto al piggaggio tradizionale, la vera sfida per il futuro è rappresentata dalla generalizzazione del metodo nei diversi impianti in cui si richiede l'applicazione. Il design del pig chimico deve passare dalla progettazione di prodotti chimici specifici, la creazione di dispositivi di generazione e lancio del batch e il mantenimento della reologia della schiuma al variare delle condizioni di flusso, pressione e temperatura in condotta.

Bibliografia

- Agip. *Impianti di trattamento per campi a gas*. Divulgazione.
- Anderson, R. P. e A. M. Erskine (1924). «Composition of Natural Gas Gasoline.» In: *Industrial & Engineering Chemistry* 16.3, pp. 263–267.
- Arachman, Fitrah et al. (2004). «Liquid unloading in a big bore completion: A comparison among gas lift, intermittent production, and installation of velocity string». In: *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Artificial Lift R&D Council. *Guidelines and Recommended Practices for Selection of Artificial Lift Systems for Deliquifying Gas Wells*.
- Attwood, David e Alexander T. Florence (2012). *FASTtrack Physical Pharmacy*. Pharmaceutical Press, pp. 44–60.
- Avallone, Giuseppe e Lucio Taglialatela. *Formazione del coning, studio mediante l'impiego della vasca elettrolitica*.
- Baker, O. (1954). «Simultaneous flow of oil and gas». In: *Oil & Gas Journal* 53.
- Bianco, Romano (2005a). «Impianti di trattamento del gas prodotto». In: *Enciclopedia degli Idrocarburi* 1, pp. 681–706.
- (2005b). «Impianti di trattamento dell'olio prodotto». In: *Enciclopedia degli Idrocarburi* 1, pp. 643–679.
- Binli, Özmen (2009). «Overview of solutions to prevent liquid-loading problems in gas wells». Tesi di laurea magistrale. Middle East Technical University, pp. 3–43.

- Bolding, Jeff L., Larry E. Hartman e Steve J. Szymczak (2007). «Resurrecting a Low-Pressure Gas Well Offshore: Through-Tubing Foamer Injection via a Capillary Tubing System and a Specialized WRSCSSV». In: *SPE 110086*, pp. 1–11.
- Borghi, Gian Paolo (2005). «Idrati di Gas». In: *Enciclopedia degli Idrocarburi* 3, pp. 85–98.
- Briceno, M. I. e D. D. Joseph (2003). «Self-lubricated transport of aqueous foams in horizontal conduits». In: *International journal of multiphase flow* 29.12, pp. 1817–1831.
- Campbell, Samuel, Sunder Ramachandran, Keith Bartrip et al. (2001). «Corrosion inhibition/foamer combination treatment to enhance gas production». In: *SPE Production and Operations Symposium*. Society of Petroleum Engineers.
- Chierici, Gian Luigi (1989). *Principi di ingegneria dei giacimenti petroliferi*. Agip.
- Coleman, Steve B. et al. (1991). «A new look at predicting gas-well load-up». In: *Journal of Petroleum Technology* 43.03, pp. 329–333.
- Davidson, Robert (2002). «An introduction to pipeline pigging». In: *Pigging Products and Services Association*, p. 9.
- Di Marco, Paolo (2006). «Appunti ed Esercizi di Fisica Tecnica e Macchine Termiche». L'equazione generalizzata di Bernoulli e la sua applicazione al calcolo dei condotti.
- Dumas, Antonio (2009). *Elementi di fluidodinamica e termocinetica*. Società Editrice Esculapio.
- ELF Idrocarburi S.p.A. (1994). *Manuale Operativo della Centrale di San Giorgio-Mare*.
- Edison S.p.A. *Fasi e operazioni che vengono effettuate per passare dalle materie prime ai vari prodotti finiti*. Allegato d1 della Domanda di Autorizzazione Ai Sensi del D.Lgs 152/06 art.269, località Marina Palmense di Fermo.

- Farn, Richard J. (2008). *Chemistry and technology of surfactants*. John Wiley & Sons.
- Gajbhiye, R. N. e S. I. Kam (2011). «Characterization of foam flow in horizontal pipes by using two-flow-regime concept». In: *Chemical Engineering Science* 66.8, pp. 1536–1549.
- Garner, Ted D. et al. (2009). «Backside Auto-Injection System». In: *SPE Production and Operations Symposium*. Society of Petroleum Engineers.
- Grace Catalysts Technologies (2010). *SYLOBEAD® Adsorbents for Natural Gas Processing*. Documento di informazione tecnica.
- Griffith, Peter et al. (1984). «Multiphase flow in pipes». In: *Journal of petroleum technology* 36.03, pp. 361–367.
- Guadagni, Andrea (2003). *Prontuario dell'ingegnere*. HOEPLI EDITORE.
- Guglielmini, G. e G. Milano (2004). «Lezioni di Fisica Tecnica 1 per allievi ingegneri meccanici e navali». DITEC - Dipartimento di Termoenergetica e Condizionamento Ambientale , Università degli Studi di Genova, A.A.: 2004/2005.
- Heuvel, Steven Oude e Sen Ubbels (2011). «Novel applications of an environmentally acceptable chemical foamer package and introduction of foamer/corrosion inhibitor/halite dispersant combination products». In: *6th European Conference on Gas Well Deliquification*. Artificial Lift Research & Development Council.
- International Coiled Tubing Association et al. (2014). *An Introduction to Coiled Tubing*.
- Johnston, Neil (2015). «Breaking with tradition». In: *World Pipelines* 15.7, pp. 39–43.
- Karam, Thereza (2013). «Foam for Flow Assurance in Gas-Condensate Pipelines». In:
- Lake, Larry W. e Kenneth E. Arnold (2006). *Petroleum Engineering Handbook*. Vol. 3. Society of Petroleum Engineers. Cap. 9.
- Lea, James F, Henry V Nickens e Mike Wells (2011). *Gas well deliquification*. Gulf Professional Publishing.

- Leopardi, Angelo (2005). «Le resistenze al moto. Note ad uso degli allievi dei corsi di Idraulica e Meccanica dei Fluidi». Università degli Studi di Cassino, Facoltà di Ingegneria.
- Li, Min, Sun Lei, Shilun Li et al. (2001). «New view on continuous-removal liquids from gas wells». In: *SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Lulio, Alberto Di et al. (2006). «Questione di pigging». In: *La Chimica & l'Industria* 88.5, pp. 14–17.
- Mele, Silvano (2012). «Produzione del gas naturale». Relazione di tirocinio. Università di Padova, pp. 22–49.
- Nallaparaju, Yashaswini Devi et al. (2012). «Prediction of Liquid Loading in Gas wells». In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Nosseir, M. A. et al. (1997). «A new approach for accurate prediction of loading in gas wells under different flowing conditions». In: *SPE Production Operations Symposium*. Society of Petroleum Engineers.
- Oyewole, Peter Olugboyega, James F. Lea et al. (2008). «Artificial-Lift Selection Strategy for the Life of a Gas Well With Some Liquid Production». In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Passucci, Claudio et al. (2015). «Foamer application in a 36" gas pipeline: a successful case of liquid unloading». In: *(13th Annual) Gas Well Deliquification Workshop*. Artificial Lift Research & Development Council.
- Peerless Mfg. Co (2009). *Vane Separators*. Brochure.
- Querzoli, Giorgio (2006). «Dispense di Meccanica dei Fluidi». Università degli Studi di Cagliari, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria del Territorio.
- Sabatella, Filippo (2009). *Gasdinamica*. Università La Sapienza.
- Saraf, Naresh M. e Deepak V. Alat (2007). «Bursting the bubble-foam killers». In: *Colourage* 54.7, p. 93.

- Schramm, Laurier L. (2000). *Surfactants: fundamentals and applications in the petroleum industry*, pp. 3–22.
- (2006). *Emulsions, foams, and suspensions: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Shaban, Habib I. (1995). «A study of foaming and carry-over problems in oil and gas separators». In: *Gas separation & purification* 9.2, pp. 81–86.
- Simpson, David (2006). «Low-pressure gas well deliquification requires different approaches». In: *Oil & gas journal* 104.8, pp. 41–50.
- Snam Rete Gas (2015). *Codice di Rete, Revisione L*. Approvato dall’Autorità per l’energia elettrica il gas e il sistema idrico con deliberazione 21/2015/R/gas.
- Soldati, A. «Laboratorio Didattico di Fluidodinamica Multifase, Dispensa n.1». Corsi di Fluidodinamica, Impianti dell’Industria di Processo, Impianti Chimici, Ingegneria Chimica ed Ambientale. Università di Udine.
- Stanculescu, Vasile, Philipp Tippel e Laurentiu Niculeanu (2014). «Best practices in Gas Well Deliquification, OMV-Petrom Romania». In: *European Gas Well Deliquification Workshop*. Artificial Lift Research & Development Council.
- T.D. Williamson, Inc. (2015). *Guide to Pigging*.
- Taitel, Yemada e A. E. Dukler (1976). «A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow». In: *AICHE Journal* 22.1, pp. 47–55.
- Tego Chemie Service GmbH (2014). *TEGO Journal*, pp. 44–53.
- Thome, John R. (2004). «Engineering data book III». in: *Wolverine Tube Inc.*
- Tiratsoo, J. N. H. (1992). *Pipeline pigging technology*. Gulf Professional Publishing.
- Turner, R. G., M. G. Hubbard, A. E. Dukler et al. (1969). «Analysis and prediction of minimum flow rate for the continuous removal of liquids from gas wells». In: *Journal of Petroleum Technology* 21.11, pp. 1–475.

- Varghese, Cherian (2011). «Intelligent pig technology for inline inspection of pipelines & indigenous capabilities development». In: *Industry Academia Workshop on 'Transportation of Oil & Gas through Pipelines'*. Petroleum Federation of India.
- Verga, Francesca (2005). «Meccanismi di spinta e fenomeni di spiazzamento». In: *Enciclopedia degli Idrocarburi* 1, pp. 509–525.
- Weatherford International Ltd. (2008). *Plunger-Lift Systems 2008 Catalog*.
- Wittfeld, C. et al. (2015). *Foam Lifting Manual: Current Best Practices from the Land Asset*.

Ringraziamenti

Ringraziamenti ancora da completare.

Tutte le persone citate in questa pagina hanno svolto un ruolo fondamentale nella stesura della tesi, ma desidero precisare che ogni errore o imprecisione è imputabile soltanto a me.