



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Vittorio BUCCI

Progetto di impianti di propulsione navale

3.4 COMBUSTIBILI

Anno Accademico 2017/2018

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

➤ Introduzione

- ✓ Per la propulsione di grandi navi sono di primaria importanza motori che funzionano secondo il ciclo Diesel ed utilizzano combustibili di tipo “pesante”, nel significato di elevata densità prossima a quella dell’acqua;
- ✓ Motori funzionanti secondo il ciclo Otto sono normalmente utilizzati soltanto per naviglio leggero da diporto o per unità per applicazioni speciali;
- ✓ Nel seguito sono pertanto brevemente illustrati i tipi di combustibili per i motori diesel e le loro caratteristiche principali;

➤ I combustibili

- ✓ I combustibili utilizzati sono di natura fossile e sono il prodotto di processi di raffinazione. Essi sono una miscela di idrocarburi con la struttura principale costituita da atomi di carbonio (C) e con atomi di idrogeno (H) variamente collegati ad essa;
- ✓ I combustibili possono contenere inoltre quantità più o meno significative di zolfo (S), azoto (N), ossigeno (O), vanadio (V), sodio (Na) ecc.;
- ✓ La struttura chimica del combustibile fissa il rapporto C/H, dal quale dipendono alcune sue proprietà principali, quali ad esempio densità, viscosità, rapporto stechiometrico, calore specifico e la capacità di reagire con l’ossigeno;

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

➤ Tipi di combustibile

- ✓ Ci sono diverse denominazioni dei combustibile, spesso confuse e non aderenti alle sue caratteristiche effettive;
- ✓ Le BSS (British Standard Specifications), le ISO (International Standard Organization) e I CIMAC (Conseils International des Machines à Combustion) hanno raccomandato codifiche per definire con più accuratezza le caratteristiche principali dei combustibili;
- ✓ Attualmente sono seguite la norma ISO 8217 del 1987 e le raccomandazioni CIMAC del 2003, le quali sostanzialmente riassumono la precedente norma ISO, che classificano i combustibili come segue:

Products	ISO
Distillate products	
❖ Gaseous fuels	
❖ Light fuels	
❖ Diesel fuels	
◆ Marine Gas Oil (MGO);	DMX
◆ Light Diesel Fuel Oil (LDF or LDO);	DMA
◆ Marine Diesel Fuel Oil (MDF or MDO);	DMB
◆ Blended marine Diesel Fuel Oil (BMDF) (light distillate oil blended with up to 20% residual oil);	DMC
❖ Lubricating oil	

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

➤ Tipi di combustibile (continua)

Products	ISO
Residual products ❖ Intermediate Fuel Oils (IFO) (residual oil blended with up to 40% distillate oil) ❖ Heavy Fuel Oil (HFO)	RMA to RMH RMH to RML

- ✓ I tipi di combustibile di interesse pratico per i motori diesel navali sono soltanto il Marine Diesel Fuel Oil (MDO) ISO DMB e l'Heavy Fuel Oil (HFO) fino all'ISO RMH55, anche se alcune volte è citato l'ISO RMK55, le cui caratteristiche saranno esposte nel seguito dopo l'illustrazione delle proprietà del combustibile.

➤ Principali proprietà dei combustibili

- ✓ **Densità**: è minore di quella dell'acqua, anche se per l'HFO la differenza è molto piccola. E' un parametro molto importante per il trasporto, lo stoccaggio, la determinazione del contenuto energetico e la definizione del metodo di trattamento. In accordo alla norma ISO, la densità è determinata ad una temperatura di riferimento di 15 °C e varia generalmente tra 840 e 991 kg/m³. La densità in funzione della temperatura è calcolata con la seguente formula:

$$\rho_2 = \rho_1 - c \cdot (T_2 - T_1);$$

nella quale "c" è un coefficiente compreso tra 0,00064 e 0,000725;

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

- ✓ **Viscosità cinematica**: è la misura della resistenza che si oppone allo scorrimento del fluido ad una temperatura di riferimento e nel sistema metrico si misura in centistokes ($\text{cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Le temperature ISO di riferimento sono di $40 \text{ }^\circ\text{C}$ per il MDO e di $100 \text{ }^\circ\text{C}$ per l'HFO, anche se per quest'ultimo tutti i costruttori di motori fanno tuttora riferimento ad una temperatura di $50 \text{ }^\circ\text{C}$. E' interessante puntualizzare che il combustibile più usato attualmente per i motori diesel marini è l'HFO con una viscosità di 380 cSt a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, denominato normalmente HFO 380, che ora nella nuova classificazione diviene un RMG con una viscosità di 35 cSt a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, rientra quindi nella categoria IFO e non HFO. Il combustibile ha una viscosità che dipende dalla sua densità e struttura chimica. Più alta è la densità e più alta è la viscosità. Due combustibili con lo stesso rapporto C/H possono invece avere viscosità differenti in funzione delle percentuali del tipo di catena strutturale del carbonio: catene lunghe (paraffine o alcali) hanno più viscosità di quelle cicliche (aromatici). Il limite superiore è: **Viscosità = 700 cSt a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ per un HFO tipo RMH55 con Densità = 991 kg/m^3**
Il valore di viscosità influenza anche la capacità o meno di pompare il combustibile o di separare con centrifughe l'acqua in esso contenuta. I valori di viscosità di riferimento sono:
Viscosità < di 500 cSt a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ per pompare il combustibile,
Viscosità < di 40 cSt a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ per separare l'acqua con centrifughe.
Il valore di viscosità per l'iniezione è prescritto dal fornitore del motore diesel.

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

- ✓ **Potere calorifico**: è il calore generato durante la combustione da un chilogrammo di combustibile. Considerato che ogni combustibile è una miscela di vari idrocarburi non esattamente noti, il potere calorifico deve essere misurato sperimentalmente.

Sono definiti due poteri calorifici: inferiore (PCI) e superiore (PCS).

Quello superiore è il calore che si genera durante la combustione, con i prodotti della combustione riportati alla temperatura iniziale per recuperare il calore di condensazione dell'acqua evaporata.

Quello inferiore è il calore che si genera durante la combustione lasciando l'acqua sotto forma di vapore. Quest'ultimo è ovviamente quello di riferimento nei bilanci energetici e nel calcolo dei consumi di combustibile dei motori.

Il potere calorifico diminuisce con l'aumento della densità del combustibile.

E' opportuno comunque tenere presente che nel motore si iniettano "volumi" e non grammi di combustibile e che per un combustibile l'aumento di densità (kg/m^3) è sempre più grande della diminuzione di potere calorifico (MJ/kg).

Pertanto, con l'aumento della densità aumenta anche il "calore" (MJ/m^3) iniettato nel cilindro. Altra conseguenza è che a parità di volume delle casse di stoccaggio a bordo, con un combustibile più denso viene immagazzinato più "calore" e si aumenta l'autonomia della nave.

Il potere calorifico del combustibile di riferimento ISO è di 42,7 MJ/kg.

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

- ✓ **Accendibilità del combustibile**: è un indice che esprime la prontezza del combustibile all'accensione. Il suo valore viene calcolato rilevando sperimentalmente il ritardo tra la fase di iniezione e quella di accensione. Il risultato viene confrontato con quello di una miscela di cetano e metilnaftene, miscelati in diverse percentuali fino ad ottenere lo stesso ritardo. Assegnando un valore “100” alla miscela di solo cetano e un valore “0” a quella di solo metilnaftene, il valore della percentuale del cetano nella miscela è il “numero di cetano” (**N.C.**) che esprime l'accendibilità del combustibile.

Il numero di cetano del gasolio è di circa 40÷60 mentre per i combustibili pesanti l'indice non ha un'importanza pratica.

Per tali combustibili, è stato sviluppato il metodo empirico “Calculated Carbon Aromaticity Index” (**CCAI**), che esprime per mezzo di un'equazione molto complessa l'indice in funzione della densità e della viscosità.

L'indice CCAI è tarato in maniera da essere pari alla viscosità per combustibili con viscosità di 1 cSt.

Il valore dell'indice è compreso tra 760 e 870, con i valori più bassi che indicano migliore accendibilità.

Tuttavia la correlazione tra tale indice e l'effettiva accendibilità del combustibile non è del tutto attendibile e pertanto è sempre preferibile eseguire dei test in sala prove sperimentale o a bordo.

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

- ✓ **Depositi di carbonio**: è la quantità di carbonio dopo il riscaldamento del combustibile con la prova Ramsbottom o Conradson. Per un combustibile leggero distillato tale residuo è intorno allo 0,25% in peso mentre per un combustibile pesante (HFO) si può avere anche il 22% in peso. E' un indice della tendenza del combustibile a formare depositi di carbonio all'interno del cilindro;
- ✓ **Contenuto di ceneri**: è il contenuto di materiale inorganico, metalli e ossidi di metalli, normalmente ferro, vanadio, sodio e nichel. Per un combustibile pesante è circa lo 0,2%;
- ✓ **Contenuto di alluminio**: è un residuo dei catalizzatori aggiunti durante il processo di “cracking” ed è quindi una misura del numero di “Catfines”, che sono particelle di alcuni micron molto dure che producono abrasione. Il valore massimo è di 30 mg/kg;
- ✓ **Contenuto di vanadio**: forma il pentossido di vanadio (V_2O_5) che è molto corrosivo e al di sotto della temperatura di 675 °C (punto di fusione) può formare depositi nel cilindro e nelle valvole di scarico (corrosione ad alta temperatura);
- ✓ **Pour point**: è la temperatura di formazione di molti cristalli di paraffina e il combustibile inizia a solidificare. Unitamente alla viscosità è un indice della capacità di pompare il combustibile;

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

- ✓ **Flash point:** è la temperatura alla quale è possibile incendiare con una piccola scintilla il vapore del combustibile. Per ragioni di sicurezza, a bordo non è consentito di imbarcare combustibili con un flash point minore di 60 °C;
- ✓ **Contenuto di zolfo:** dipende essenzialmente dalla provenienza del petrolio greggio. Lo zolfo abbassa il calore generato durante la combustione e forma dopo la combustione ossidi, i quali sono emissioni contaminanti dei gas di scarico e possono formare acido solforico con l'acqua. La bassa temperatura favorisce la formazione di acido solforico, che è altamente corrosivo, e pertanto la temperatura dei gas di scarico non deve essere inferiore a 120 °C. La IMO ha prescritto un limite massimo di contenuto di zolfo nell'HFO del 4,5% in peso. La legge europea prescrive per i combustibili leggeri (LDF) un contenuto massimo di zolfo inferiore allo 0,2%. Inoltre, entreranno in vigore a ottobre 2007 le regole SOLAS che limitano il contenuto di zolfo all'1,5% per la navigazione nel Mar Baltico e nel Mare del Nord;
- ✓ **Contenuto di acqua:** l'acqua eventualmente emulsionata con il combustibile per ridurre le emissioni di NO_x dovrebbe essere distillata. Qualsiasi utilizzo di acqua non pulita deve essere evitato. In particolare, il contenuto di sodio di acqua leggermente salata potrebbe, in combinazione con il vanadio, corrodere le parti calde del cilindro e dello scarico.

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

- La seguente tabella riassume le caratteristiche del combustibile per un motore 2T del tipo RT-Flex richieste dalla Wärtsilä:

Parameter	Unit	Bunker limit	Test method *1)	Recommended fuel quality	
				Bunker	Engine inlet
		ISO 8217:1996 class F, RMK55			
Density at 15°C	[kg/m ³]	max. 1010 *2)	ISO 3675: 1993	max. 1010	max. 1010
Kinematic viscosity	[mm ² /s(cSt)]	–	ISO 3104: 1994	–	13–17
• at 50°C	[mm ² /s(cSt)]	–	ISO 3104: 1994	max. 730	–
• at 100°C	[mm ² /s(cSt)]	max. 55.0	ISO 3104: 1994	max. 55.0	–
Carbon residue	[m/m (%)]	max. 22	ISO 10370: 1993	max. 15	max. 15
Sulphur	[m/m (%)]	max. 5.0	ISO 8754: 1992	max. 3.5	max. 3.5
Ash	[m/m (%)]	max. 0.20	ISO 6245: 1993	max. 0.05	max. 0.05
Vanadium	[mg/kg (ppm)]	max. 600	ISO 14597: 1997	max. 100	max. 100
Sodium	[mg/kg (ppm)]	–	AAS	max. 50	max. 30
Aluminium plus Silicon	[mg/kg (ppm)]	max. 80	ISO 10478: 1994	max. 30	max. 15
Total sediment, potential	[m/m (%)]	max. 0.10	ISO 10307: 1993	max. 0.10	max. 0.10
Water	[v/v (%)]	max. 1.0	ISO 3733: 1976	max. 1.0	max. 0.3
Flash point	[°C]	min. 60	ISO 2719: 1988	min. 60	min. 60
Pour point	[°C]	max. 30	ISO 3016: 1994	max. 30	max. 30

Remark: *1) ISO standards can be obtained from the ISO Central Secretariat, Geneva, Switzerland (www.iso.ch).

*2) Limited to max. 991 kg/m³ (ISO-F-RMH55), if the fuel treatment plant cannot remove water from high density fuel oil.

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

- La tabella riporta le caratteristiche del combustibile richieste dalla MAN B&W per un motore 2T serie MC:

Property	Units	Value
Density at 15 °C	kg/m ³	≤ 991*
Kinematic viscosity at 100 °C at 50 °C	cSt	≤ 55
	cSt	≤ 700
Flash point	°C	≥ 60
Pour point	°C	≤ 30
Carbon residue	% mass	≤ 22
Ash	% mass	≤ 0.15
Total sediment after ageing	% mass	≤ 0.10
Water	% volume	≤ 1.0
Sulphur	% mass	≤ 5.0
Vanadium	mg/kg	≤ 600
Aluminum + Silicon	mg/kg	≤ 80

*) May be increased to 1.010 provided adequate cleaning equipment is installed, i.e. modern type of centrifuges.

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

➤ Caratteristiche combustibile pesante richieste per un motore 4T Wärtsilä:

Property	Unit	Limit HFO 1	Limit HFO 2	Test method ref.
Viscosity at 100°C, max.	cSt	55	55	ISO 3104
Viscosity at 50°C, max.	cSt	700	700	
Viscosity at 100°F, max	Redwood No. 1 s	7200	7200	
Viscosity, before injection pumps ⁴⁾	cSt	20±4	20±4	
Density at 15°C, max.	kg/m ³	991 / 1010 ¹⁾	991 / 1010 ¹⁾	ISO 3675 or 12185
CCAI, max. ⁴⁾		850	870 ²⁾	ISO 8217, Annex B
Water, max.	% volume	0.5	0.5	ISO 3733
Water before engine, max. ⁴⁾	% volume	0.3	0.3	ISO 3733
Sulphur, max.	% mass	1.5	4.5 ⁵⁾	ISO 8754 or 14596
Ash, max.	% mass	0.05	0.15	ISO 6245
Vanadium, max. ³⁾	mg/kg	100	600 ³⁾	ISO 14597 or IP 501 or 470
Sodium, max. ^{3,4)}	mg/kg	50	50	ISO 10478
Sodium before engine, max. ^{3,4)}	mg/kg	30	30	ISO 10478
Aluminium + Silicon, max.	mg/kg	30	80	ISO 10478 or IP 501 or 470
Aluminium + Silicon before engine, max. ⁴⁾	mg/kg	15	15	ISO 10478 or IP 501 or 470

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

- **Caratteristiche combustibile pesante richieste per un motore 4T Wärtsilä (continua):**

Property	Unit	Limit HFO 1	Limit HFO 2	Test method ref.
Carbon residue, max.	% mass	15	22	ISO 10370
Asphaltenes, max. ⁴⁾	% mass	8	14	ASTM D 3279
Flash point (PMCC), min.	°C	60	60	ISO 2719
Pour point, max.	°C	30	30	ISO 3016
Total sediment potential, max.	% mass	0.10	0.10	ISO 10307-2
Used lubricating oil, calcium, max. ⁶⁾	mg/kg	30	30	IP 501 or 470
Used lubricating oil, zinc, max. ⁶⁾	mg/kg	15	15	IP 501 or 470
Used lubricating oil, phosphorus, max. ⁶⁾	mg/kg	15	15	IP 501 or 500

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

➤ Note alle tabelle precedenti relative al combustibile pesante per un motore 4T Wärtsilä:

Remarks:

- 1) Max. 1010 kg/m³ at 15°C provided the fuel treatment system can remove water and solids.
- 2) Straight run residues show CCAI values in the 770 to 840 range and are very good ignitors. Cracked residues delivered as bunkers may range from 840 to - in exceptional cases - above 900. Most bunkers remain in the max. 850 to 870 range at the moment.
- 3) Sodium contributes to hot corrosion on exhaust valves when combined with high sulphur and vanadium contents. Sodium also contributes strongly to fouling of the exhaust gas turbine blading at high loads. The aggressiveness of the fuel depends not only on its proportions of sodium and vanadium but also on the total amount of ash constituents. Hot corrosion and deposit formation are, however, also influenced by other ash constituents. It is therefore difficult to set strict limits based only on the sodium and vanadium content of the fuel. Also a fuel with lower sodium and vanadium contents than specified above, can cause hot corrosion on engine components.
- 4) Additional properties specified by the engine manufacturer, which are not included in the ISO specification.
- 5) A sulphur limit of 1.5% mass will apply in SO_x emission controlled areas designated by IMO (International Maritime Organization). There may also be other local variations.
- 6) A fuel shall be considered to be free of used lubricating oil (ULO), if one or more of the elements calcium, zinc, and phosphorus are below or at the specified limits. All three elements shall exceed the same limits before a fuel shall be deemed to contain ULO's.

The limits above concerning HFO 2 also correspond to the demands of the following standards:

- BS MA 100: 1996, RMH 55 and RMK 55
- CIMAC 2003, Grade K 700
- ISO 8217: 2005(E), ISO-F-RMK 700

The fuel shall not include any added substances or chemical waste, which jeopardizes the safety of installations or adversely affects the performance of the engines or is harmful to personnel or contributes overall to air pollution.

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

➤ Caratteristiche combustibile pesante richieste per un motore 4T MAN B&W:

Fuel oil specification										
CIMAC 2003			A30	B30	D80	E/F180	G/H/K380	-	H/K700	See
BS MA-100				M4	M5	M7	8/9	M8/-	M9/-	
ISO F-RM			A10	B/C10	D15	E/F25	G/H/K35	H/K45	H/K55	
Fuel-system related characteristic values										
Viscosity (at 50°C)	mm ² /s (cSt)	max.	40	40	80	180	380	500	700	"Viscosity/injection viscosity", Page 3-30
Viscosity (at 100°C)		max.	10	10	15	25	35	45	55	"Viscosity/injection viscosity", Page 3-30
Density (at 15°C)	g/ml	max.	0.975	0.981	0.985	0.991/1.010			"Heavy fuel oil treatment", Page 3-30	
Flash point	°C	min.	60						"Flash point (ASTMD-93)", Page 3-32	
Pour point (summer)		max.	6	24	30			"Low temperature behaviour (ASTM D-97)", Page 3-32, and "Pump ability", Page 3-33		
Pour point (winter)		max.	0	24	30			"Low temperature behaviour (ASTM D-97)", Page 3-32, and "Pump ability", Page 3-33		

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

➤ Caratteristiche combustibile pesante richieste per un motore 4T MAN B&W (continua):

Fuel oil specification										
CIMAC 2003	A30	B30	D80	E/F180	G/H/K380	-	H/K700	See		
BS MA-100		M4	M5	M7	8/9	M8/-	M9/-			
ISO F-RM	A10	B/C10	D15	E/F25	G/H/K35	H/K45	H/K55			
Engine-related characteristic values										
Carbon residues (Conradon)	% wt.	max.	10	10/14	14	15/20	18/22	22	22	"Combustion properties", Page 3-33
Sulphur			3.5	3.5	4	5			"Sulphuric acid corrosion", Page 3-35	
Ash	0.10		0.15		0.20		"Heavy fuel oil treatment", Page 3-30			
Vanadium	mg/kg		150	150/300	350	200/500	300/600	600	"Heavy fuel oil treatment", Page 3-30	
Water	% vol.		0.5		0.8	1			"Heavy fuel oil treatment", Page 3-30	
Sediment (potential)	% wt.		0.1							

Impianti di propulsione navale

Motori alternativi a combustione interna – Brevi note sui combustibili

➤ Caratteristiche combustibile pesante richieste per un motore 4T MAN B&W (continua):

Fuel oil specification									
CIMAC 2003		A30	B30	D80	E/F180	G/H/K380	-	H/K700	See
BS MA-100			M4	M5	M7	8/9	M8/-	M9/-	
ISO F-RM		A10	B/C10	D15	E/F25	G/H/K35	H/K45	H/K55	
Supplementary characteristic values									
Aluminium and silicon	mg/kg	max.	80					"Heavy fuel oil treatment", Page 3-30	
Asphalts	% wt.		2/3 of carbon residues (Conradson)					"Combustion properties", Page 3-33	
Sodium	mg/kg		Sodium < 1/3 vanadium, sodium < 100					"Heavy fuel oil treatment", Page 3-30	
Cetane number of low-viscosity constituent minimum 35							"Ignition quality", Page 3-33		
Fuel free of admixtures not based on mineral oil, such as coal oils or vegetable oils; free of tar oil and lubricating oil (used oil)									